

**ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ, ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР
ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ, САМАРҚАНД ДАВЛАТ
УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.27.06.2017.FM/Т.34.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

**ИСЛОМ КАРИМОВ НОМИДАГИ
ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ**

МАВЛОНОВ ҒИЁСИДДИН ҲАЙДАРОВИЧ

**КИРИШМА АТОМЛАРИ НАНОКЛАСТЕРЛАРИГА ЭГА БЎЛГАН
КРЕМНИЙНИНГ МАГНИТ ХОССАЛАРИНИ БОШҚАРИШ**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ ДОКТОРИ (DSc)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

ТОШКЕНТ – 2018

Докторлик (DSc) диссертацияси автореферати мундарижаси

Оглавление автореферата докторской (DSc) диссертации

Contents of the Doctoral (DSc) Dissertation Abstract

Мавлонов Ғиёсиддин Ҳайдарович

Киришма атомлари нанокластерларига эга бўлган
кремнийнинг магнит хоссаларини бошқариш 3

Мавлонов Ғиёсиддин Ҳайдарович

Управление магнитными свойствами кремния с
нанокластерами примесных атомов 27

Mavlonov Giyosiddin Khaydarovich

Control of the magnetic properties of silicon
with nanoclusters of impurity atoms 51

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works 55

**ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ, ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР
ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ, САМАРҚАНД ДАВЛАТ
УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ
DSc.27.06.2017.FM/T.34.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

**ИСЛОМ КАРИМОВ НОМИДАГИ
ТОШКЕНТ ДАВЛАТ ТЕХНИКА УНИВЕРСИТЕТИ**

МАВЛОНОВ ҒИЁСИДДИН ҲАЙДАРОВИЧ

**КИРИШМА АТОМЛАРИ НАНОКЛАСТЕРЛАРИГА ЭГА БЎЛГАН
КРЕМНИЙНИНГ МАГНИТ ХОССАЛАРИНИ БОШҚАРИШ**

01.04.10 – Яримўтказгичлар физикаси

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ ДОКТОРИ (DSc)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

ТОШКЕНТ – 2018

Физика-математика фанлари бўйича доктор (DSc) диссертацияси мавзуси Ўзбекистан Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий Аттестация комиссиясида B2017.1.DSc/FM79.рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Ислон Каримов номидаги Тошкент давлат техника университетида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгашнинг веб-саҳифасида info.fti@uzsci.net ҳамда «Ziyonet» Ахборот-таълим портали www.ziyonet.uz манзилларида жойлаштирилган.

Илмий маслаҳатчи: **Илиев Халмурат Маджидович**
Физика-математика фанлари доктори, профессор

Расмий оппонентлар: **Рембега Станислав Иванович**
Физика-математика фанлари доктори, профессор

Зайнобидинов Сирожиддин
Физика-математика фанлари доктори, академик, профессор

Камалов Амангелди Базарбаевич
Физика-математика фанлари доктори, доцент

Етакчи ташкилот: **Тошкент ахборот технологиялари университети**

Диссертация ҳимояси Физика-техника институти, Ион-плазма ва лазер технологиялари институти, Самарқанд давлат университети ҳузуридаги DSc.27.06.2017.FM/T.34.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2018 йил «__» _____ соат ____ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100084, Тошкент ш., Бодомзор йўлиқўчаси, 26-уй. Физика-техника институти мажлислар зали. Тел./факс: (99871) 235-42-91, e-mail: info.fti@uzsci.net).

Диссертация билан Физика-техника институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (_5_ рақами билан рўйхатга олинган). Манзил: 100084, Тошкент ш., Бодомзор йўли қўчаси, 26-уй. Физика-техника институтининг маъмурий биноси, мажлислар зали. Тел./факс: (99871) 235-30-41.

Диссертация автореферати 2018 йил «__» _____ да тарқатилди.
(2018 йил «_5_» _____ даги _____ рақамли реестр баённомаси).

С.А. Бахрамов
Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш раиси, ф.-м.ф.д., профессор,
Ўз Фа академиги

А.В. Каримов
Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш илмий котиби, ф.-м.ф.д., профессор

И.Г. Атабаев
Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш қошидаги илмий семинар раиси, ф.-м.ф.д., профессор

КИРИШ (докторлик (DSc) диссертациясининг аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳон миқёсида бугунги кунда жадаллик билан ривожланаётган яримўтказгичлар соҳасида истиқболли йўналишлардан бири бўлган магнит наноструктурали материалларни ва улар асосида катта интеграция даражасидаги ҳажмий интеграл микросхемаларни олиш, магнит хотирали элементларни, магнит қаршиликли сенсорларни, янги турдаги сезгир магнит датчикларни, фотомагнит асбобларни яратиш ҳамда уларни такомиллаштириш бўйича илмий изланишлар олиб борилмоқда. Бу борада наноэлектроника ва саноат электроникасининг асосий хомашёси бўлган кремнийнинг кристалл панжаралари ва фаза таркибини сезиларли даражада бузилишга олиб келмаган ҳолда, магнит хусусиятга эга бўлган наноструктураларни ҳосил қилиш ва уларнинг магнит хоссаларини бошқариш муҳим вазифалардан бири бўлиб ҳисобланади.

Бугунги кунда жаҳонда ионли имплантация, радиациали нурлар, эпитаксияли ўстириш ҳамда кимёвий усуллар ёрдамида турли қотишма ва гетероструктураларда магнит хусусиятли нанокластерларни ҳосил қилишга катта аҳамият берилмоқда. Бу борада, мақсадли илмий тадқиқотларни жумладан, қуйидаги йўналишлардаги илмий изланишларни амалга ошириш муҳим вазифалардан ҳисобланади: кремний панжарасида паст ҳароратли босқичма-босқич диффузияли легирлаш ёрдамида марганец атомларининг магнит хусусиятли нанокластерларини шакллантириш ҳисобига магнит наноструктурали материалларни олиш усулини ишлаб чиқиш; нанокластерлар структурасини, ўлчамини ва магнит моментини ҳамда нанокластерларга эга кремнийнинг магнит сингдирувчанлигини ва магнитланишини аниқлаш; кремнийнинг магнит хоссаларини ундаги магнит хусусиятли нанокластерларнинг концентрациясига ва электрофизик параметрларига боғлиқ равишда ҳароратнинг кенг соҳасида турли ташқи таъсирлар ёрдамида бошқариш; ҳароратнинг паст соҳасида кремнийни ферромагнит ҳолатга ўтишини аниқлаш.

Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантиришнинг Ҳаракатлар стратегиясида белгиланган вазифаларни амалга оширишда, илмий ва инновация ютуқларини амалиётга жорий этишнинг самарали механизмларини яратиш масалаларига алоҳида эътибор қаратилмоқда. Фаол тадбиркорлик, инновацион ғоялар ва технологияларни қўллаб-қувватлаш йили олинган илмий натижаларни ҳозирги замон талабларига жавоб берадиган даражага олиб чиқиш алоҳида эътиборга сазовор. Бу борада яримўтказгичли материалларни сиртида наноструктураларни ҳосил қилишнинг янги усулларини яратиш ва тадқиқ қилиш асосида янги турдаги яримўтказгичли асбоблар, ёруғлик, босим, намлик ва ҳарорат датчиклари, юқори кучланишли ва частотали диодлар ишлаб чиқиш масалаларига алоҳида эътибор қаратилган, кремнийда эрувчанлиги катта бўлган нодир ер элементлари (гадолиний, европий, голмий, саммарий) билан легирлашнинг оптимал усуллари аниқланган. Бу борада материалнинг бутун ҳажми бўйича

электрофизик параметрлари бошқариладиган магнит хусусиятли нанокластерларни шакллантириш ва улар ҳисобига материалнинг магнит хоссаларини бошқариш муҳим аҳамиятга эга.

Ушбу диссертация тадқиқоти маълум даражада Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сонли «Ўзбекистон Республикасини янада ривожланиши бўйича ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармони, 2017 йил 13 февралдаги ПҚ-№2772-сонли «2017-2021 йилларда электроника саноатини ривожлантиришнинг устувор йўналишлари тўғрисида»ги ва 2017 йил 17 февралдаги ПҚ-№2789-сонли «Фанлар академиясининг фаолиятини, илмий тадқиқот ишларини ташкил этиш, бошқариш ва молиялаштиришни янада такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги Қарорлари ҳамда мазкур фаолиятга тегишли бошқа меъёрий-ҳуқуқий ҳужжатларда белгиланган вазифаларни амалга оширишга хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги. Диссертация иши Ўзбекистон Республикаси фан ва технологияларни устувор ривожлантиришни: III. «Энергетика, энергия ресурс тежамкорлиги, транспорт, машина ва асбобсозлик» йўналишига мос ҳолда бажарилиб, замонавий электроника, микроэлектроника, фотоника, спинтроника ва электрон асбобсозликни ривожланишида муҳим аҳамиятга эга.

Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий-тадқиқотлар шарҳи¹. Материалларнинг магнит хоссаларини тадқиқ қилиш соҳасидаги илмий тадқиқотлар жаҳоннинг етакчи илмий марказлари ва олий таълим муассасаларида, жумладан: Токио университети (Япония), Флорида давлат университети (АҚШ), Небраска – Линколн университети (АҚШ), Юонси университети (Ж.Кореа), Квант-функцияли тадқиқот маркази (Ж.Кореа), Кюнпок миллий университети (Ж.Кореа), Лил фан ва технология университети (Франция), Лондон нанотехнология маркази (Англия), Мурсия университети (Испания), Хитой технология университети (Хитой Халқ Республикаси), Москва давлат университети (Россия), Физика - техника институти (Санкт-Петербург, Россия), Воронеж давлат университети (Россия), Физика - техника институти (Украина), Ўзбекистон миллий университети (Ўзбекистон), Самарқанд давлат университети (Ўзбекистон) да олиб борилмоқда.

Квантфункционали тадқиқот марказида (Ж.Кореа) хароратнинг паст соҳасида яримўтказгичли материалларни ферромагнит ҳолатига ўтишини тадқиқ қилинган, Dalhousie университети (Канада) Al-Pd-Mn-B кристаллининг магнит хоссаларини тадқиқ қилиш натижасида бу материалда магнит қаршилик кузатилган, Калифорния технология институти (АҚШ) ҳамда Микроэлектрон технология марказида (Калифорния, АҚШ)

¹MnZnFe nanoparticles for self-controlled magnetic hyperthermia // J. Magn. Mater. 2012. Vol. 324. P. 3620-3628., Negative magnetoresistance produced by hall fluctuations in a ferromagnetic domain structure // Applied. Physics. Letters. – 2001.–V.79.– N.7.– P. 979- 981., Alexandr D., Michel D., et al. Classical origin for a negative magnetoresistance and for its anomalous behavior at low magnetic fields in two dimensions // Revista Mexicana De Física 2006. S 52 №3. C.185–189.

$\text{La}_{0,7}\text{Ca}_{0,3}\text{MnO}_3$ юпка қатламининг магнит хусусиятга эга эканлигини, Монтпеллер университети (Франция) AlAs-GaAs бирикмасини кремнийга қўшиш натижасида манфий магнит қаршилиқни ҳосил бўлиши тадқиқ қилган. Париж-суд университети (Франция) ва Қаттиқ жисим физикаси илмий тадқиқот институтида (Германия) темир ва хром элементларидан ташкил топган мулти қатламда юқори магнит қаршилиқни ҳосил қилиб, қаттиқ дискларда маълумотларни ёзиш ва сақлаш имкониятлари очиб берилган.

Ҳозирги вақтда жаҳонда магнит хусусиятли яримўтказгич материалларни ҳосил қилиш ва уларнинг магнит хусусиятларини тадқиқ қилиш бўйича бир қатор устувор йўналишларда тадқиқотлар олиб борилмоқда жумладан: спинтроника йўналишини ривож учун магнит структурали материалларни яратиш; паст ҳароратларда кузатилаётган ўта катта магнит қаршилиқларни хона ҳароратига олиб чиқиш; магнит қаршилиқли сенсорларни яратиш ва уларнинг сезгирлигини ошириш; кремний асосида сезгирлиги юқори бўлган магнит датчиклар ва магнит сезгир яримўтказгич асбобларни яратиш ҳамда уларнинг ишлаш вақтини ва ҳароратга барқарорлигини ошириш.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Кейинги вақтларда яримўтказгичларда киришма атомларининг магнит нанокластерларини шакллантириш ва уларни хоссаларидан фойдаланиш ҳам етарли даражада ўрганилмоқда. Т.И. Воронина, Т.С.Лагунова, М.П.Михайлова, К.Д. Моисеева, А.Ф. Липаева, Ю.П. Яковлеваларнинг ишларида GaInAsSb/InAs:Mn, гетероструктураларнинг хоссаларини тадқиқ қилишга мўлжаллаб, ўстирилган юқори концентрацияли ($n > 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) Mn атомлари билан легирланганда структураларда аномал Холл эффекти ва манфий магнит қаршилиқ мавжудлиги аниқланган ва у Mn ионларининг InAs гетероўтиш чегарасидаги юқори ҳаракатчан электронларни каналдаги ўзаро алмашуви натижасида ҳосил бўлиши исботлаб берилган.

А.Д. Таланцев, О.В. Коплак, Р.Б. Моргунов муаллифларнинг ишларида MnSb кластерларида GaMnSb юпка қатламидаги ковакларни концентрацияси таъсири натижасида ферромагнитизм кузатилган. Ковакларни юқори концентрацияси Шоттки тўсиғи орқали кластер-кристалл панжара чегарасида туннелланишига ва бу кластерлар магнитланишининг ўзгаришига олиб келади. Юпка қатламларни магнит қаршилиги, ташқи магнит майдонида кластерларни магнитланганлиги ҳисобига бошқариладиган коваклар спинининг қутбланишига боғлиқлиги билан кўрсатилган.

Профессор С.И. Рембезаниннг ишларида электронли парамагнит ва ядроли магнит резонанси усуллари орқали яримўтказгичларнинг кристалл панжарасида киришмалар ва нуқсонларнинг физикавий хоссаларини тадқиқ қилиш натижалари тизимлаштирилган ва умумлаштирилган.

Академик М.К. Бахадирханов ишларида яримўтказгичларда атомларнинг янги ҳолати сифатида киришма атомлари кластерларининг шаклланиши асослари таклиф қилинган ҳамда ҳар хил табиатли киришма

атомлари нанокластерларига эга бўлган кремнийнинг фотоэлектрик ва магнит хоссалари ўрганилган.

G.W. Ludwig, H.H. Woodbury ва J.Kreissl, W.Gehlhoff муаллифларни ишларида, шунингдек Ўзбекистон олимларидан К.П. Абдурахманов, С. Зайнабидинов, Т.С. Камиров, Ш.Б. Утамурадоваларнинг ишларида марганец билан легирланган кремнийни диффузиядан кейин секин совутишда, марганецни 4 та атомидан иборат нанокластерлари ҳосил бўлиши аниқланган.

Аммо, совутиш тезлигини бошқариш асосида электрофизик параметрлари такрорланадиган намуналарини олиш имконини берадиган технология яратилмади, ҳамда амалда киришма нанокластерларини таркиби, структурасининг ўлчами, магнит моменти, наноструктурага эга бўлган кремнийни магнит ва электрофизик хусусиятлари ўрганилмаган.

Диссертация мавзусини диссертация иши бажарилган олий таълим муассасаси илмий-тадқиқот ишлари билан боғлиқлиги. Диссертация иши Тошкент давлат техника университетини «Рақамли электроника ва микроэлектроника» кафедрасида бажарилган: Ф2-47 рақамли «Магнит кластерли кремнийнинг ферромагнит ҳолатлари шаклланишининг физикавий асосларини тадқиқ қилиш» (2012-2016 йй.), Ф2-44 рақамли «Ярим ўтказгичларда киришма атомларининг ўз-ўзини ташкиллаштириш механизмининг ва уларнинг параметрларини бошқаришни тадқиқ қилиш» (2012-2016 йй.) шунингдек, ҳозирги вақтдаги ОТ-Ф2-55 «Янги функционал имкониятларга эга наноматериалларнинг янги синфи сифатидаги киришма атомлари нанокластерларини шаклланиши негизда хажмий структуралашган кремнийни олишнинг илмий асосларини ишлаб чиқиш» (2017-2020 йй.) мавзусидаги фундаментал лойиҳалар доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади кремнийнинг магнит хоссаларини марганец киришмалари атомларининг магнит хусусиятли нанокластерлари концентрацияси ва электрофизик параметрларига боғлиқ равишда ҳароратнинг кенг соҳасида турли ташқи таъсирлар ёрдамида бошқаришдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

паст ҳароратли босқичма-босқич диффузияли легирлаш усули ёрдамида кремний панжарасида марганец атомларининг магнит нанокластерларини шакллантириш ҳисобига, магнит наноструктурали материалларни олиш технологиясини ишлаб чиқиш;

ҳарорат, электр ва магнит майдонларининг кенг оралиғида магнит нанокластерли кремнийнинг магнит қаршилигини бошқариш имкониятларини тадқиқ қилиш;

магнит нанокластерли кремнийнинг таркибидаги нанокластерларнинг концентрациясига боғлиқ равишда, магнит қаршилигини ўзгариш қонуниятини аниқлаш;

магнит нанокластерли кремнийнинг фотомагнит хусусиятини, интеграл (оқ) ҳамда инфрақизил спектр соҳасидаги нурлар билан ёритилганида тадқиқ қилиш;

Турли ташқи таъсирларнинг (ҳарорат, электр майдони, ёритилганлик) бир вақтдаги таъсирида манфий магнит қаршиликни тадқиқ этиш; магнит кластерларни шакллантириш йўли билан ферромагнит кремнийни олиш имкониятини кўрсатиш ва илмий асослаш;

тажриба натижалари асосида марганец атомларини нанокластерларининг магнит моментини, ҳамда магнит нанокластерли кремнийнинг магнит сингдирувчанлиги ва магнитланганлигини аниқлаш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида электроника саноатида фойдаланиладиган КДБ- 2; 3; 5; 10; 100 маркали кремний монокристалли танлаб олинди. Киришма сифатида парамагнит атом бўлиб ҳисобланган марганец танланиб, у $S=5/2$ спинли $3d^5 4s^2$ электрон структуралардан иборат.

Тадқиқотнинг предмети кремний кристалл панжарасида марганец атомларининг текис тақсимланган магнит хусусиятли нанокластерларини шакллантириш жараёнидан иборат.

Тадқиқотнинг усуллари. Кремний панжарасидаги марганец атомларининг ҳолатини замонавий электрон парамагнит резонанс ва атом кучлари микроскопи ҳамда рентген структурали таҳлил замонавий усуллардан фойдаланиб амалга оширилган.

Намуналарни фотомагнит хоссалари ИКС-21 (Инфрақизил спектр) ва электромагнит асосида яратилган махсус қурилма ёрдамида тадқиқ қилинди. Бу қурилма электр ва магнит майдонини, ҳароратни, шунингдек инфрақизил нурланишнинг тўлқин узунлиги ва қувватини кенг ораликда ўзгартириш имконини беради.

Намуналарни паст ҳарорат соҳасидаги ферромагнит ҳолати СКВИД (ўта ўтказувчи квантли интерференцияли датчик - сверхпроводящий квантовый интерференционный датчик) -магнитометр қурилмаси ёрдамида тадқиқ қилинган. (Жанубий Кореянинг Сеул шаҳридаги Донгук университетининг яримўтказгичларни квантофункционал тадқиқот марказида, ижодий ҳамкорликда)

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

кремний панжарасида ҳажм бўйича тенг тақсимланган ва параметрлари бошқариладиган марганец атомларининг магнит хусусиятли нанокластерларини шакллантириш имкониятини берадиган паст ҳароратли босқичма-босқич амалга ошириладиган диффузия технологиясининг режимлари оптималлаштирилган;

марганец атомлари нанокластерларининг ҳароратга барқарорлиги ҳисобига, марганец атомлари билан легирланган кремнийнинг электрофизик параметрларини юқори ҳароратларда турғунлигини ошириш усули ишлаб чиқилган;

кремнийдаги марганец атомларининг магнит хусусиятга эга бўлган нанокластерлари концентрациясини 10^{15} см^{-3} гача ошириш ҳисобига хона ҳароратида ўта юқори қийматдаги манфий магнит қаршилиги кузатилиши аниқланган;

марганец атомларининг магнит хусусиятли нанокластерларига эга

бўлган кремнийда, магнит майдон индукцияси ортиши билан, манфий магнит қаршилигининг қиймати чизикли ортиши аниқланган;

бир вақтнинг ўзида кучли магнит моментга ва зарядга эга бўлган нанокластерларнинг зарядларини интеграл (оқ) ва инфрақизил ёруғлик таъсирида камайиши ҳисобига манфий магнит қаршилиқнинг қийматини 100 мартагача сўниш эффекти топилган;

кремнийда магнит моментига эга бўлган марганец атомлари нанокластерларининг спинларини, ҳароратнинг 30 К дан паст соҳасида, тартибли йўналиш ўрнатилиши ҳисобига, кремнийни ферромагнит ҳолатга ўтиши аниқланган;

нанокластерли кремнийнинг 10 К ҳароратдаги, тажриба асосида аниқланган магнитланганлик (χ_{Mn}) қиймати ёрдамида марганец атомлари нанокластерларининг магнит моменти ҳисобланган;

энергия (кТ) ортиши билан нанокластерларнинг спинларини тартибланган йўналишининг бузилиши ҳисобига, кремнийнинг магнитланганлигини ҳарорат ошиши билан чизикли камайиши аниқланган;

электр майдон кучланганлигини $0,1 \div 600$ В/см ва магнит майдон индукцияси $0,2 \div 2$ Тл оралиғида, ҳамда 240 К ҳароратда, нанокластерли кремнийнинг магнит қаршилигини 6 мартагача ошириш имконияти кўрсатилган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

кристалли бутун ҳажми бўйича марганец атомларининг наноструктурасига эга бўлган кремнийни олиш технологияси ишлаб чиқилган;

кремний таркибидаги нанокластерларнинг концентрациясини кўпайтириш ҳисобига, манфий магнит қаршилигининг қийматини ошириш усули ишлаб чиқилган. Бу ўз навбатида, магнит хусусиятли нанокластерларга эга бўлган кремний асосида сезгирлиги юқори бўлган магнит датчикларни ишлаб чиқаришга имкон яратади;

марганец атомлари нанокластерларининг ҳароратга барқарорлиги ҳисобига, марганец атомлари билан легирланган кремнийнинг электрофизик параметрларини юқори ҳароратларга турғунлигини ошириш усули ишлаб чиқилган. Бу ўз навбатида кремний асосида юқори ҳароратларга барқарор наноструктураларни олиш, ҳамда юқори ҳароратларга ва кучланишларга барқарор юқори частотали диодларни ишлаб чиқариш имконини берган;

юқори ҳароратли манфий магнит қаршилиқ қийматини ташқи таъсирлар ёрдамида (ҳарорат, ёритилганлик, электр майдон) бошқариш мумкинлиги аниқланган ва олинган натижалар асосида физик катталиқларни ўлчовчи функционал датчикларни яратиш имкони борлиги кўрсатилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги кремнийдаги марганец атомлари нанокластерларнинг тузилишларини аниқлашда интеграл сезгирлиги $\sim 5 \cdot 10^{10}$ спин/Гс ва уларни ўрнатиш аниқлиги 0,001% ни ташкил қиладиган электрон парамагнитик резанатор, замонавий атом кучли микроскопи, рентген структурали таҳлил усуллари ҳамда олинган

материалларнинг электрофизик хусусиятларини аниқлашда Холл усули ва кремнийнинг ферромагнит ҳолатини аниқлашда СКВИД магнитометр курилмасини қўлланилганликлари билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти.

Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти монокристалл кремний панжарасида марганец атомларининг магнит нанокластерларини шаклланишининг физик механизмларини тушунтириш, юқори ҳароратларда бундай материалларда аномал юқори манфий магнит қаршилик кузатилишининг физик моҳиятини асослаб бериш ва унинг қийматини ташқи таъсирлар ёрдамида бошқариш қонуниятларини ҳамда янги фотомангнит материал сифатида магнит нанокластерли кремний хоссаларини бошқариш имконини яратади.

Ишнинг амалий аҳамияти шундан иборатки, марганец атоми нанокластерларига эга бўлган кремний асосида юқори сезгирликка эга бўлган магнит ва фотомангнит асбоблар, физик катталарни ўлчаш имконини берадиган кўп функцияли датчикларни ишлаб чиқиш мумкинлиги, шунингдек ферромагнитли кремнийни олиш имконини беради.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши: Кремнийнинг магнит хоссаларини унда шакллантирилган марганец атомларининг магнит хусусиятли нанокластерларнинг концентрациясига ва электрофизик параметрларига боғлиқ равишда ҳароратнинг кенг соҳасида турли ташқи таъсирларнинг ёрдамида бошқаришни тадқиқ қилиш натижалари асосида:

кремнийни «паст ҳароратли ва босқичма-босқич легирлаш» технологияси «FOTON» акциядорлик жамияти томонидан наноструктурали ферромагнит хусусиятига эга бўлган кремний кристалларини олишда фойдаланилган («Ўзэлтехсаноат» акциядорлик компаниясининг 2017 йил 6 октябрдаги 02/2074-сон маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш юқори частотали диодларнинг ташқи таъсирга чидамлилигини ошириш имконини берган;

нанокластерларнинг зарядларини интеграл (оқ) ва инфрақизил ёруғлик таъсирида бошқариш натижалари Туркманистон Фанлар академияси Қуёш энергияси институтида бажарилган «Наноўзгарувчан зонали кенг спектрал сезгирликка эга (0.1-3 мкм) янги фотоэлементларни тайёрлаш ва ишлаб чиқиш» (2012–2015) мавзусидаги лойиҳасида зоналари ўзгариб борувчи наноструктурали гетероўтишларда инфрақизил соҳадаги сезгирлигини бошқаришда қўлланилган (Туркманистон Фанлар академияси Қуёш энергияси институтининг 2017 йил 9 ноябрдаги 162/17-сон маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш металл-яримўтказгич структурали спектрометрик элементларнинг спектрал сезгирлигини узун тўлқин томонига кенгайтириш имконини берган;

киришмани диффузияда фаоллашиш энергияси кичик бўлган паст ҳароратли кўп босқичли диффузия ўтказиш тартиби ПФИ ФЗ-ФА-0-56434 рақамли «Қуёш элементлари ва яримўтказгич асбоблар учун юпқа қатламли ва наноқатламли структураларни шакллантиришнинг физикавий қонуниятлари» (2012–2016) мавзусидаги лойиҳани бажаришда карбид

кремний кристаллининг фаол соҳасида бор ва алюминий киришма атомлари диффузиясини амалга оширишда қўлланилган (Фан ва технологиялар агентлигининг 2017 йил 24 октябрдаги ФТА-02-11/940-сон маълумотномаси). Илмий натижалардан фойдаланиш юпқа қатламли тажрибавий намуналар олиш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Ишни асосий натижалари 8 та халқаро ва 10 та республика илмий-амалий анжуманларда маруза қилинган ва муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилинганлиги. Диссертация материаллари бўйича 33 та илмий иш нашр қилинган, улардан 2 таси монография, Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг докторлик диссертациялари асосий илмий нашрларини чоп этишга тавсия этилган илмий нашрларда 13 та мақола нашр этилган.

Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши. Диссертация кириш, 6 та боб, хулоса ва фойдаланилган адабиётлар рўйхатидан иборат. Диссертациянинг матни 200 бетда келтирилган.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация мавзусини долзарблиги ва замонавий илмий тадқиқотлар талабига мослиги асосланган, фан ва технологияни асосий устувор ривожланиш йўналишлари билан тадқиқотнинг боғлиқлиги аниқланган, халқаро илмий тадқиқотларни диссертация мавзуси бўйича таҳлили ва муаммони ўрганилиш ҳолати келтирилган. Муаммо ҳолатини таҳлили ва мавзунинг долзарблиги асосланган, танланган йўналишнинг илмий янгилиги, ишнинг мақсади ва муаммонинг ечимини ҳал қилишдаги асосий вазифалар ҳамда амалга ошириладиган тадқиқотларнинг илмий ва амалий аҳамияти ёритилган.

Диссертациянинг **«Яримўтказгичли материалларнинг магнит хоссалари»** деб номланган биринчи бобида соҳа бўйича илмий адабиётлар таҳлил қилинган. Турли яримўтказгичларда ва структураларда манфий магнит қаршилиқ (МаМК) ва мусбат магнит қаршилиқ (МуМК) ни ўрганиш бўйича тадқиқотларнинг энг сўнги маълумотлари ва уларнинг аҳамияти, шунингдек физик механизмлари ҳамда ферромагнит материалларни олиш технологиялари баён қилинган.

Диссертациянинг **«Магнит нанокластерларга эга бўлган кремний намуналарини тайёрлаш технологиясини ишлаб чиқиш ва уларнинг электрофизик хусусиятларини ўлчаш»** деб номланган иккинчи бобида паст ҳароратли босқичма-босқич диффузияли легирлаш ёрдамида кремний панжарасида киришма марганец атомларининг нанокластерларини шаклланиши ҳисобига магнит наноструктурали материални олишнинг қулай усули, шунингдек тажрибани ўтказиш усуллари ҳақида маълумотлар келтирилган.

Танланган легирлаш усули, босқичма-босқич ҳароратни маълум бир тезликда ошириш орқали диффузияни ўтказишга асосланган. Бу усул нанокластерларни шакллантириш жараёнида марганец киришма атомларнинг максимал иштирокини таъминлашга имкон беришидан ташқари, кремний материалнинг бутун ҳажми бўйича магнит хусусиятли нанокластерларнинг тенг тақсимланиш имкониятлари кўрсатилган. Диффузия жараёнида киришма атомларининг фаоллашиш энергиясининг тажрибада аниқланган қиймати ва унга мос равишда диффузияни ҳароратга боғлиқлиги

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right),$$
 юқори ҳароратли диффузия асосида киришмаларни

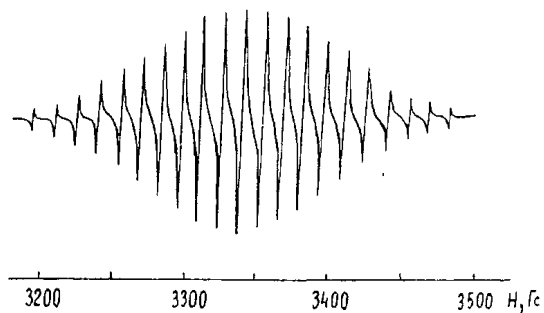
кремнийдаги эрувчанлик формуласидан паст ҳароратли диффузия шароитда фойдаланиш мумкин эмаслиги тўлиқ асослаб берилди. Паст ҳароратли диффузия жараёни юқори ҳароратли диффузиядан анча тез содир бўлади ва тугунлараро киришма атомларининг диффузияси ҳақидаги фарзани тўлиқ тасдиқлайди.

Янги технология билан кремний панжарасига киритилган марганец атомларининг ҳолати замонавий электрон парамагнитли резонанс (ЭПР), атом кучли микроскоп (АКМ) ҳамда рентген структурали таҳлил усулларда тадқиқ қилинган.

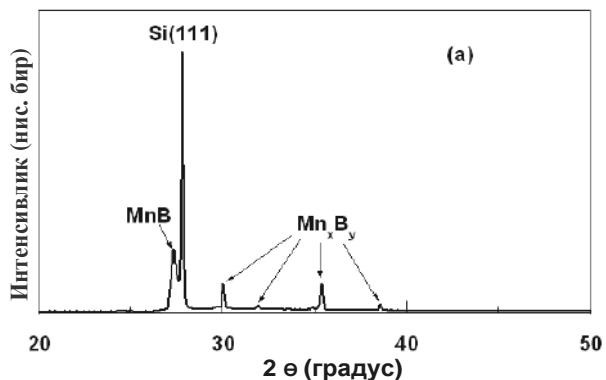
Кремний панжарасидаги марганец атомлари ҳолатининг табиати ЭПР спектри ёрдамида «Брокер» курилмасида 77 К ҳароратда тадқиқ қилинди. Унда ЭПР спектрларини қайт қилиш учун тўлқин узунлигини 3-х сантиметрли диапазонда ишлайдиган спектрометрдан фойдаланилди. Асбобни интеграл сезгирлиги $\sim 5 \cdot 10^{10}$ спин/Гс бўлиб, ўлчашни ўрнатиш аниқлиги 0,001% ни ташкил қилди. Кузатилаётган спектрдаги g-факторни аниқлаш $g=2,0024$ маркер чизиғи бўйича амалга оширилди.

Тадқиқот натижалари шуни кўрсатдики, Ферми сатҳи $F=E_V+(0,38 \div 0,45)$ эВ ораликдаги янги технология бўйича олингани $p\text{-Si} \langle \text{B}, \text{Mn} \rangle$ намуналарда 21 та чизиғидан иборат бўлган ўта юпқа ЭПР спектри аниқ кузатилди (1а-расм). Бу нанокластерларнинг таркиби тўртта марганец атомидан ташкил топганини тасдиқлайди. Ферми сатҳи $F=E_V+(0,38 \div 0,45)$ дан тақиқланган соҳани ўртасигача $F=E_V+(0,52 \div 0,55)$ эВ силжиганда, Mn^{++} ҳолатидаги атомлар концентрациясини камайиши ва мос ҳолда Mn^+ ҳолатидаги атомлар концентрациясини ошиши ҳисобига ЭПР спектрининг интенсивлигини сусайиши кузатилди.

Жанубий Кореянинг Сеул шаҳридаги Донггук университетининг яримўтказгичларни Квантофункционал тадқиқот маркази жамоаси билан ҳамкорликда олиб борилган изланишлар учун магнит нанокластерига эга бўлган кремний намуналари тайёрланди. Рентген дифрактометрида Mn билан легирланган Si намуналарининг структурасини таҳлили амалга оширилди. 1б -расмда Si (111) да марганец атомларининг нанокластерлари бўлган намуналарида кузатилган дифракцион чўкқилари келтирилган, бу (Mn_4B) марганец-бор комплексини ҳосил бўлишини кўрсатади.



1а- расм. Кремнийда 4 та марганец атомидан иборат бўлган нанокластерни ЭПР спектри



1б -расм. Магнит кластерларини рентгенографик тасвири

Диффузия жараёнида аниқ термодинамик шароитларни билиш, кремний панжарасида кластерларни ҳосил бўлишининг энг кичик потенциал энергиясини аниқлаш имконини берди. Марганец атомларининг ўзаро кулон таъсирлашиши ҳамда марганец атомлари билан бор атомларининг ўзаро таъсирини ҳисобга олиб амалга оширилган назарий ҳисоблашлар асосида нанокластерларнинг ўлчами аниқланди. Бу 0,7 дан 1,4 нм гача қийматни ташкил этар экан.

Шундай қилиб, паст ҳароратли диффузия жараёнида нафақат сирти эрозияга учрамаган ва сирт ости соҳасида силицидлар ҳосил бўлмаган кремний намуналарини олиш, ҳамда кремний намуналарида белгиланган чуқурликда ва концентрацияда марганец киришма атомларини бир текис тақсимлаб легирлаш мумкинлиги кўрсатиб берилди.

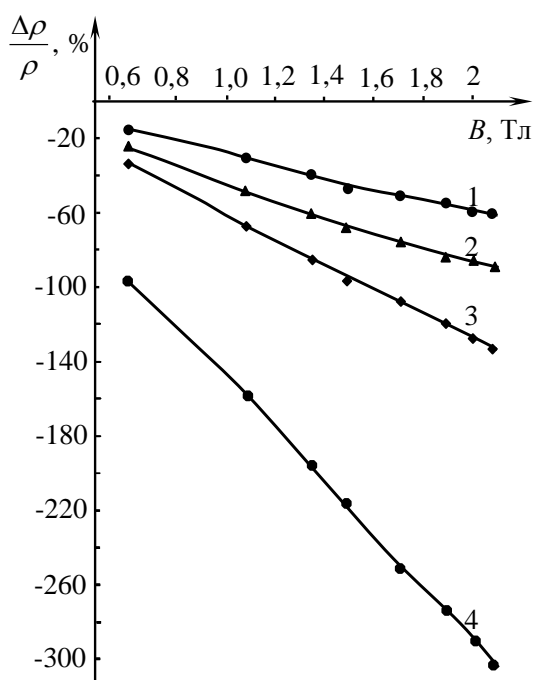
Диссертациянинг «**Марганец атомларининг магнит нанокластери бўлган ва нанокластерлар ҳосил бўлмаган марганец атомлари билан легирланган кремнийнинг магнит қаршилиги**» деб номланган учинчи бобида, марганец атомларининг магнит нанокластерларига эга *p*-турдаги кремнийни ва ошириб компенсацияланган *n*-турдаги намуналарни ҳамда *p*-турдаги нанокластерсиз намуналарнинг магнит қаршилигини тадқиқ қилишдаги аниқланган янги илмий натижалар келтирилган. Кремнийнинг магнит хоссасини магнит майдонининг қийматига боғлиқлиги, МаМҚ ни пайдо бўлишида магнит нанокластерларини ҳиссаси, ҳамда МаМҚ эффекти кузатилишининг ҳарорат чегараларини аниқлашдаги натижалар берилди.

МаМҚ ҳосил бўлишида магнит нанокластерларнинг ҳиссасини билиш учун турли концентрацияда нанокластерлари бўлган бир хил солиштира қаршиликли намуналар тайёрланди. $N=10^{15}$ см⁻³ нанокластерлар концентрациясига эга бўлган намуналарда хона ҳароратида ва электр майдон кучланганлиги $E=100$ В/см бўлганда қиймати жуда катта $\Delta\rho/\rho\sim 300$ % бўлган МаМҚ кузатилди ва бунда магнит майдонининг сезгирлиги $\alpha=150$ %/Тл ни ташкил қилди (2а- расм). Тажриба натижалари шуни кўрсатдики, магнит нанокластерларининг концентрацияси ортиши билан МаМҚ ни қиймати сезиларли ошди.

Олинган натижалар кремний намуналарида МаМҚ ни пайдо бўлиши ва унинг табиати бевосита панжарадаги марганец атомлари нанокластерини мавжудлиги билан боғлиқ эканлиги, ҳамда нанокластерларни концентрациясини ўзгартириш йўли билан МаМҚ қийматини кенг ораликда бошқариш имкониятлари мавжудлигини тасдиқлади. Нанокластерларнинг концентрациясини $2\cdot 10^{13}\div 10^{15}$ см⁻³ ораликда ошириш билан, бир хил тажриба шароитида МаМҚ ни қиймати 8÷10 марта ошиши аниқланди ва бунда намуналарнинг магнит майдонига сезгирлигини $\alpha=28$ %/Тл дан $\alpha=150$ %/Тл гача ошириш мумкинлиги кўрсатиб берилди. Ишлаб чиқилган такомиллаштирилган диффузион технологиядан фойдаланилиб олинган намуналарда нанокластернинг концентрациясини $N=10^{17}$ см⁻³ гача етказиш мумкинлиги аниқланди. Бунда намуналардаги МаМҚ нинг қийматини 1,5 даражагача катта бўлишини кутуш мумкин.

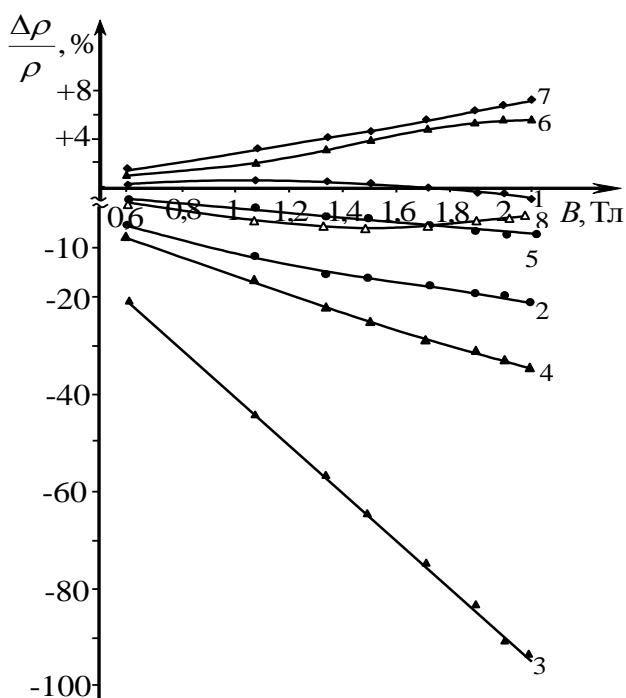
2.б - расмда Ферми сатҳининг ҳолати $F=E_V+0,29\div E_V+0,48$ эВ ораликда бўлган *p*-Si<В, Mn> нанокластерли намуналарнинг ҳамда ошириб компенсацияланган Ферми сатҳи $F=E_C-(0,35\div 0,54)$ эВ ораликда бўлган *n*-Si<В, Mn> намуналарни магнит қаршилигига магнит майдон қийматининг таъсири натижалари тасвирланган. *p*-турдаги Ферми сатҳи $F\leq E_V+0,28$ эВ бўлган намуналарда катта бўлмаган МуМҚ кузатилди ва унинг қийматини ўзгариши магнит майдонига кучсиз боғланганлиги аниқланди. Ферми сатҳи

$F \geq E_V + 0,29$ эВ га силжиганда магнит майдонини кичик қийматларда, қиймати катта бўлмаган МуМҚ кузатилди ва унинг қиймати магнит майдонини ошиши билан камайди. Магнит майдон индукцияси $B \geq 1,8 \div 1,9$ Тл бўлганда бу намуналарнинг магнит қаршилигини ишораси ўзгарди, яъни МуМҚ дан МаМҚ га ўтди (2б –расм, 1-эгри чизик). Кўп сонли тажрибалар шуни кўрсатдики, нанокластерли кремнийда Ферми сатҳининг чегаравий қиймати $F \sim E_V + 0,29$ эВ бўлганда МаМҚ эффеќти намоён бўлар экан. Марганец атомларининг магнит нанокластерларига эга бўлган кремний намуналарида Ферми сатҳи $F \sim E_V + 0,29$ эВ дан таќикланган соҳани ўртасига силжиши МаМҚ эффеќтини кучайишига олиб келар экан (2б- расмдаги 2, 3 чизик).



1- $N_{(Mn)4} = 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, 2- $N_{(Mn)4} = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$,
3- $N_{(Mn)4} = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, 4- $N_{(Mn)4} = 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

2а-расм. Турли концентрациядаги нанокластерларга эга бўлган намуналаридаги МаМҚ ни магнит майдонига боғлиқлиги. $T=300$ К, $E=100$ В/см



p -турдаги: 1- $F = E_V + 0,29$ эВ, 2- $F = E_V + 0,32$ эВ, 3-
 $F = E_V + 0,385$ эВ, 4- $F = E_V + 0,434$ эВ, 5- $F = E_V + 0,48$ эВ.
 n -турдаги: 6- $F = E_C - 0,45$ эВ, 7- $F = E_C - 0,384$ эВ.,
 p -турдаги нанокластерсиз: 8- $F = E_V + 0,385$ эВ

2б-расм. Ферми сатҳини турли ҳолатларида p -Si<B,Mn> и n -Si<B,Mn> намуналаридаги МҚ ни магнит майдонига боғлиқлиги. $E=100$ В/см, $T=300$ К

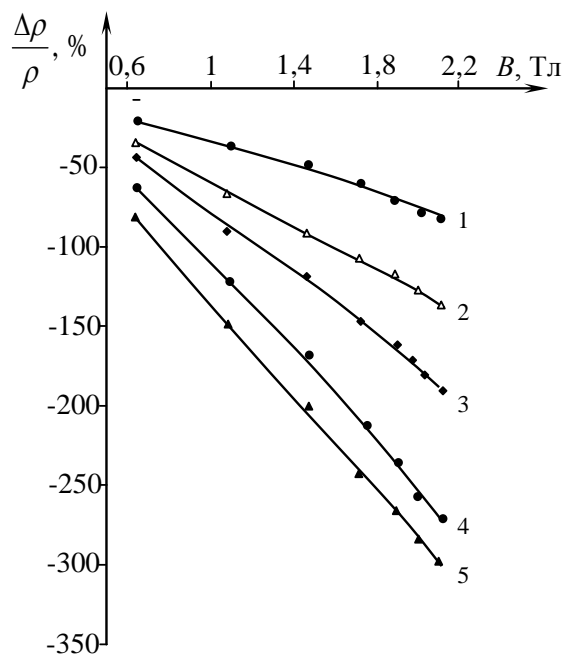
МаМҚ нинг қиймати магнит майдонинг қиймати ортиши билан ошади ва $T=300$ К ҳароратда Ферми сатҳи қиймати $F \sim E_V + 0,375 \div E_V + 0,385$ эВ бўлган намуналарда МаМҚ ни максимал қиймати кузатилди. Ошириб компенсацияланган намуналарда хона ҳароратида Ферми сатҳига боғлиқ бўлмаган ҳолда унча катта бўлмаган МуМҚ кузатилди (2б- расм 6, 7 чизик). Ўрганилган намуналарда Ферми сатҳи ўтказувчанлик соҳасини тагидан таќикланган соҳани ўртасига силжиганда МуМҚ қиймати чизикли ошиб борди ва ўзгариш 2,5 % дан 7 % гача бўлди. Ҳарорат пасайиши билан МуМҚ қиймати секин камайди ва $T \sim T_{nop}$ (T_{nop} - МаМҚ ни пайдо бўлиш ҳарорати) бўлганда МҚ ни ишораси МуМҚ дан МаМҚ га ўзгарди. Ферми сатҳи

тақиқланган соҳанинг ўртасидан ўтказувчанлик соҳаси томон силжиши билан марганец атомлари икки карра зарядланган ҳолатидан бир карра зарядланган ҳолатига ўтиши кузатилади ва шунга мос равишда Ферми сатҳи $F=E_C-0,37$ эВ ҳолатида бўлган намуналарда $T=150$ К ҳароратда МаМК нинг максимал қиймати 35% ни ташкил қилди. Ошириб компенсацияланган намуналарда МаМК ни кузатилиши марганец атомларини $S=5/2$ спинга эга эканлиги ва уларни заряд ҳолати билан тушунтирилди.

МаМК ни максимал қиймати Ферми сатҳи $F=E_v+(0,375\div 0,385)$ эВ бўлган намуналарда кузатилиши аниқланди. Бундай намуналарда Ферми сатҳининг ҳолатини бошқариш орқали манфий магнит қаршилик қийматини ўзгариш қонуниятини аниқланди.

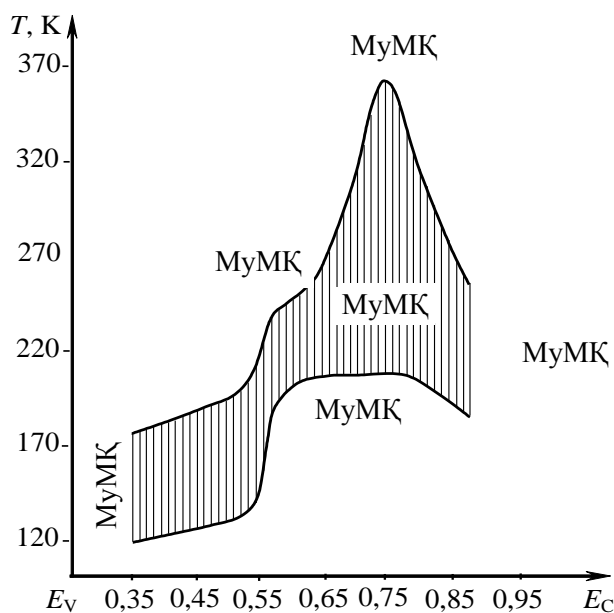
Ҳарорат пасайиши билан МаМК ни қийматининг ортиши кузатилиб, магнит майдонни ортиши билан намуналарининг МаМК гини $\frac{\Delta\rho}{\rho}(B)$ чизиқли боғлиқлиги сақланар экан (3а -расм).

Компенсацияланган ва ошириб компенсацияланган намуналарда МК ни тадқиқ қилишда олинган натижалар асосида, Ферми сатҳининг тақиқланган соҳада жойлашиш ҳолатига боғлиқ МаМК ва МуМК ни кузатилишини паст ва юқори ҳарорат чегаралари аниқланди (3б-расм).



1-300 К, 2-283 К, 3-270 К, 4-262 К, 235 К.

3а-расм. Ферми сатҳи ҳолати $F=E_v+0,385$ эВ бўлган p -Si<В, Mn> намунадаги МаМК ни турли ҳароратларда магнит майдонга боғлиқлиги. $E=100$ В/см



3б-расм. МаМК мавжудлигининг ҳарорат соҳасини, марганец киришма атомлари билан легирланган кремнийдаги Ферми сатҳининг ҳолатига боғлиқлиги. $B=2$ Тл, $E=100$ В/см

3б- расмда марганец билан легирланган кремнийда етарли даражада кенг ҳарорат оралиғида катта МаМК кузатилар экан. Кремнийда Ферми сатҳининг ҳолатини бошқариб МаМК нинг қийматини етарли даражада катта ораликда

($T=300$ К ҳароратда $1 \div 100$ %) ўзгартириш имкони борлиги аниқланди. Ферми сатҳининг ҳолати $F=E_V+0,29$ эВ дан $F=E_C-0,32$ эВ гача чегараси оралиғида, ҳароратнинг $T=120 \div 370$ К соҳалари оралиғида МаМҚ кузатилди.

Диссертациянинг «**Марганец билан легирланган кремнийдаги манфий магнит қаршиликга ташқи физик катталикларнинг таъсири**» деб номланган тўртинчи бобида, МаМҚ ни электр майдонида боғлиқлиги ҳамда интеграл ва монохроматик ёритилганликнинг таъсирини тажрибада ўрганишдаги натижалар келтирилган. Бунда асосий вазифа, нанокластерли кремнийнинг магнит қаршилигини ташқи таъсирлар натижасида ўзгариш қонуниятини ҳамда МаМҚ ни максимал қийматини олишда электр майдонининг оптимал қийматини ва магнит қаршиликни ёруғликнинг интенсивлигига боғлиқ ўзгаришини аниқлашдан иборат.

Олинган тажриба маълумотларининг таҳлили шуни кўрсатадики, ёритилганлик МаМҚ ни камайишига ва сўнишига ҳамда МҚ нинг ишорасини ўзгаришига олиб келар экан. Бу натижалар МҚ ни ўрганишдаги янги физик ҳодиса ҳисобланади. МаМҚ ни қоронғиликдаги бошланғич қиймати қанча катта бўлса, МҚ нинг ишорасини алмашишини қиймати ёритилганлик интенсивлигининг катта қийматига тўғри келди (4а-расм).

Тажрибада аниқланган маълумотлар бир томондан ўрганилинаётган материалларни магнит хоссалари марганец атомлари кластерларининг энергетик сатҳларини қайта зарядланиши сабаб бўлса, иккинчи томондан бошқа яримўтказгичли магнит материалларида кузатилмаган фотомангнит сезгирлиги мавжудлигини кўрсатди.

Пастроқ ҳароратларда намуналарнинг магнит қаршилиги хоссаларига ёруғлик интенсивлиги таъсирини тадқиқ қилинишида аниқланган натижалар ҳам қизиқиш уйғотади. 4б- расмда нанокластерга эга бўлган кремнийнинг турли даражадаги фон ёруғлиги остида МҚ ни ҳароратга боғлиқлиги кўрсатилган. Кўришиб турибдики, ёритилганлик бўлмаганда ҳарорат пасайиши билан МаМҚ ни қиймати сезиларли даражада тез ортади ва ҳарорат $T=235 \div 240$ К бўлганда ўзини максимал қийматига етди. Бунда МаМҚ ни қийматининг ўзгариши $\Delta\rho/\rho=300$ % ни ташкил қилди. Бу

боғланишни $\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_T = \left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_0 \left(\frac{T_0}{T}\right)^5$ қонуният кўринишида ($T=240 \div 330$ К, $T_0=300$

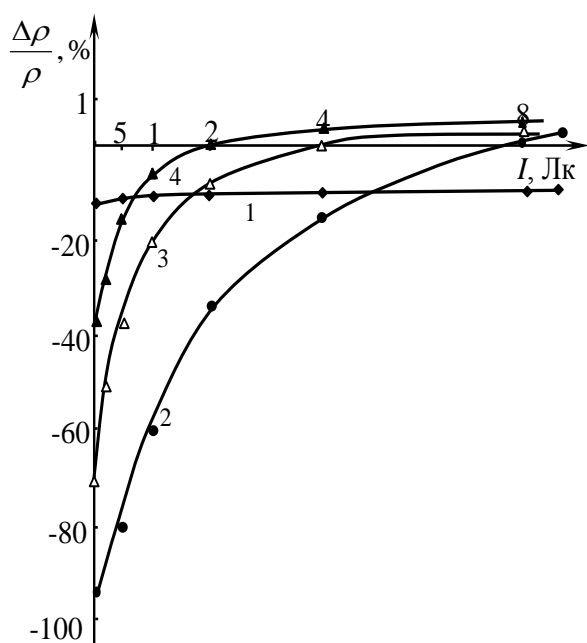
К) ёзиш мумкин. Ҳароратни $T=215 \div 220$ К гача камайиши МаМҚ нинг қийматини камайишга олиб келди. Бу боғлиқликни қуйидаги

$\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_T = \left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_1 \left(\frac{T_1}{T}\right)^{-5}$ ($T=170 \div 240$ К) кўринишида ифода қилиш мумкин. Ҳарорат

$T \leq 170 \div 175$ К бўлганда МҚ ни ишораси ўзгаради яъни, МаМҚ дан МуМҚ га ўтади.

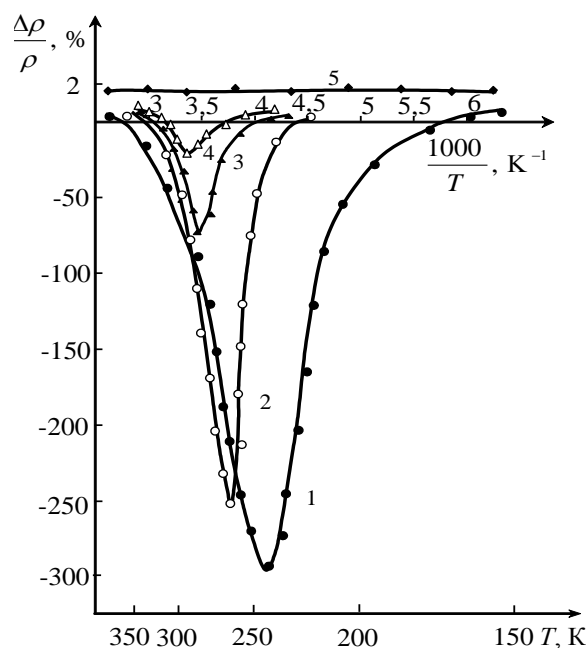
Тадқиқотлар $I=10$ Лк; 40 Лк; 80 Лк ва 160 Лк ёритилганликда ўтказилди (4б-расм 2, 3, 4, 5 эгри чизиқлар). Бунда қизиқарли физик ҳодисалар кузатилди. Биринчидан, ёритилганлик МаМҚ нинг қийматини сезиларли камайишига олиб келди. Масалан $T=240$ К бўлганда МаМҚ ни қиймати

$\frac{\Delta\rho}{\rho} \sim 300\%$ дан нолгача камайди. Иккинчидан, ёритилганда максимал МаМҚ нинг кузатилиши ҳарорат қийматининг юқори томонга силжиши (2, 3, 4 эгри чизиқлар).



1- $F=E_V+0,3$ эВ, 2- $F=E_V+0,38$ эВ,
3- $F=E_V+0,42$ эВ, 4- $F=E_V+0,44$ эВ.

4а-расм. Ферми сатҳи турли ҳолатларда бўлган p -турдаги Si<В,Мn> намуналардаги МҚ ни ёритилганлик интенсивлигига боғлиқлиги.
 $E=100$ В/см, $T=300$ К



1- қоронғилатилгандаги;
2- $I=10$ Лк; 3- $I=40$ Лк;
4- $I=80$ Лк; 5- $I=160$ Лк.

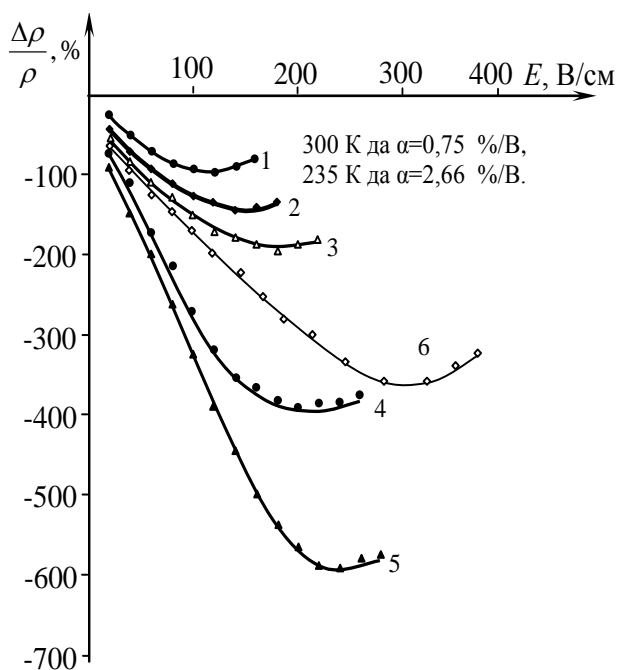
4б-расм. Ферми сатҳини $F=E_V+0,38$ эВ бўлган Si<В,Мn> намунадаги МҚ ни ҳароратга боғлиқлиги.
 $E=100$ В/см, $B=2$ Тл.

Учинчидан, ёритилганлик МаМҚ кузатиладиган ҳарорат соҳасини сезиларли даражада кичиклаштирди. Ёритилганлик интенсивлигининг янада ошиши билан МаМҚ ни кузатиладиган ҳарорат соҳаси янада торайиб $I=160$ Лк да МаМҚ амалда йўқолди (4б-расмдаги 5- эгри чизиқ). Бунда шуни кўрсатиш мумкинки, ёритилганлик МҚ нинг ишорасини ўзгартириб фаза ўтишига олиб келар экан.

5- расмда Ферми сатҳи $F=E_V+0,385$ эВ бўлган намунанинг МаМҚ гини турли ҳароратларда электр майдонга боғлиқлигини ўрганиш натижалари келтирилган.

Натижалар шуни кўрсатадики, электр майдони ортиши билан барча ҳароратларда МаМҚ ни қийматлари чизиқли ортади. Электр майдони янада ортиши билан МаМҚ нинг қийматини чизиқли ортиши кучсизланади ва у ўзини максимал қийматига (E_m) эришади. Электр майдон қийматини янада ортиши МаМҚ ни камайишига олиб келди. 5-расмдан кўришиб турибдики, ҳарорат пасайиши билан МаМҚ қийматининг чизиқли ортиш соҳаси кенгайди ҳамда МаМҚ нинг максимал қиймати E_m электр майдонининг катта қийматлари томонига силжиди.

Ҳарорат $T=235$ К ва $E_m = 240$ В бўлганида МаМҚ максимал қийматга эга



1-300 К, 2-283 К, 3-270 К, 4-62 К, 5-235 К, 6-220 К

Расм. 5. Ферми сатҳи $F=E_V+0,385$ эВ бўлган p -Si<В,Мn> намунасининг магнит қаршиликни, турли ҳароратларда электр майдонга боғлиқлиги. $B=2$ Тл.

Диссертациянинг «Кремнийдаги манфий магнит қаршиликни инфрақизил нурлар таъсирида сўниш эффекти» деб номланган бешинчи бобида, марганец атомларининг магнит нанокластерлари мавжуд p -Si<В,Мn> намуналарида МаМҚ нинг қийматига инфрақизил (ИҚ) нурнинг спектрал таъсири, магнит ва электр майдон, ҳароратни кенг соҳадаги боғлиқликлари ҳамда ИҚ-нурланиш энергиясининг турли қийматларидаги таъсирини ўрганишдаги аниқланган натижалар келтирилган.

Марганец атомлари нанокластерларига эга бўлган кремний намуналаридаги МаМҚ нинг қийматига хона ҳароратида тушаётган ёруғлик ИҚ-нурининг $\lambda=1,2\div 4$ мкм бўлгандаги тўлқин узунлигига боғлиқлиги тадқиқ қилинган, нурланиш қуввати $5\cdot 10^{-5}$ Вт/см², магнит майдон қиймати $B=0\div 1,7$ Тл қилиб танлаб олинди.

ИКС (ИҚН)-21 спектрометри асосида махсус қурилма яратилган бўлиб, у электр ва магнит майдон қийматини ҳамда ҳароратнинг кенг ораликда ўзгартириш имконини берди.

Намуналардаги МаМҚ ни нисбий ўзгариши $\left[\left(\frac{\Delta\rho}{\rho} \right)_{\text{тем}} / \left(\frac{\Delta\rho}{\rho} \right)_{\text{hv}} \right]$ ифода асосида ҳисобланган (бу ерда $\left(\frac{\Delta\rho}{\rho} \right)_{\text{hv}}$ - $h\nu$ энергияли ИҚ-нурланиш таъсиридаги МаМҚ; $\left(\frac{\Delta\rho}{\rho} \right)_{\text{тем}}$ - ИҚ-нурланиш мавжуд бўлмагандаги МаМҚ). МаМҚ ни тушаётган ИҚ нурланиш фотонларининг энергиясига боғлиқлиги

бўлди ($\Delta\rho/\rho=600\%$).

Ҳароратни $T<235$ К дан кичик қийматларида МаМҚ камайди, аммо электр майдонининг қийматини ортириш билан унинг камайишини бошқариб кўпайтириш мумкин бўлди.

Хона ҳарорати шароитида марганец атомларининг кластерлари мавжуд бўлган кремнийда МаМҚ ни сўниш ҳодисаси ҳамда ёруғлик интенсивлиги билан бошқариб МҚ нинг ишорасини ўзгариш мумкинлиги электроника ва асбобсозлик соҳасида магнит ва ёруғлик датчикларининг томомила янги синфини яратиш имкониятлари очиб берилди.

ба-расмда келтирилган.

Тадқиқот натижалари шуни кўрсатадики, нурланишнинг $h\nu=0,3$ эВ (4 мкм) қийматидан бошлаб Ферми сатҳи $F=E_V+0,385$ эВ бўлган намуналарда МаМҚ нинг қийматини камайиши кузатилди. Тушаётган ёруғлик фотонларининг энергиясини ортиши билан МаМҚ ни камайиши кучайди ва ўзини максимал қийматига $h\nu=1$ эВ бўлганда эришди яъни, хона ҳарорати шароитида МаМҚ нинг сўнишини ғайри оддий эффекти кузатилди ва унинг қийматини 30 мартадан кўп камайиши аниқланди.

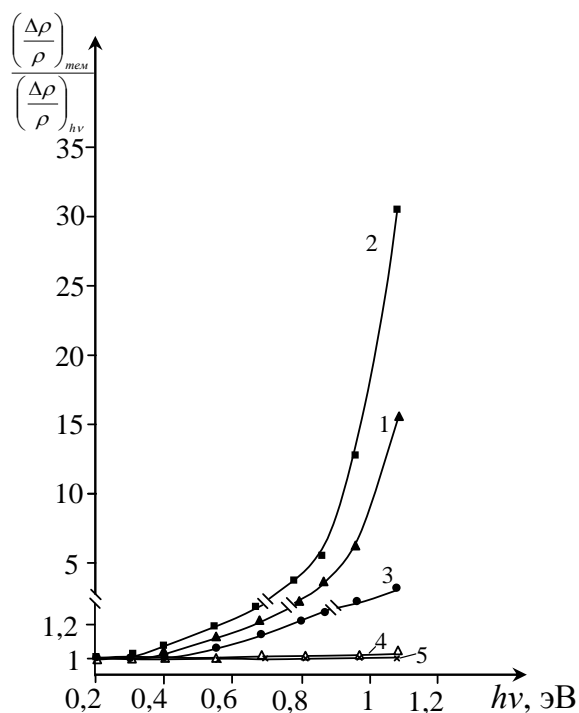
Бу натижалар ИҚ-нурланишнинг тўлқин узунлиги $\lambda=1,2\div 4$ мкм гача ўзгарганида МаМҚ қийматини етарлича катта ораликда бошқариш мумкинлигини кўрсатди.

Тадқиқот натижаларини таҳлили асосида, МаМҚ ни ИҚ ёруғлик таъсирида сўниш эффекти марганец атомлари нанокластерига эга бўлган барча p -турдаги кремний намуналарда кузатилиши аниқланди. Шуни қайт этиш керакки, сўниш даражаси намуналардаги Ферми сатҳини ҳолатига яъни намуналарнинг солиштира қаршилигига кчли боғлиқ экан. МаМҚ ни максимал сўниши Ферми сатҳи энергиясининг қиймати $F=E_V+0,375$ эВ бўлган намуналарда кузатилди. Ферми сатҳи $F=E_V+0,375$ эВ дан тақиқланган соҳани ўртаси томон силжиганида сўниш даражаси камайди. Ферми сатҳи $F>E_V+0,48$ эВ бўлган ҳамда ошириб компенсацияланган намуналарда МаМҚ ни сўниш эффекти кузатилмади.

6б-расмда Ферми сатҳи $F=E_V+0,37$ эВ бўлган нанокластерли p -Si<B,Mn> намунанинг МаМҚ гини электр майдонга боғлиқлигининг турли энергияли фотонлар таъсиридаги ўзгаришлари келтирилган.

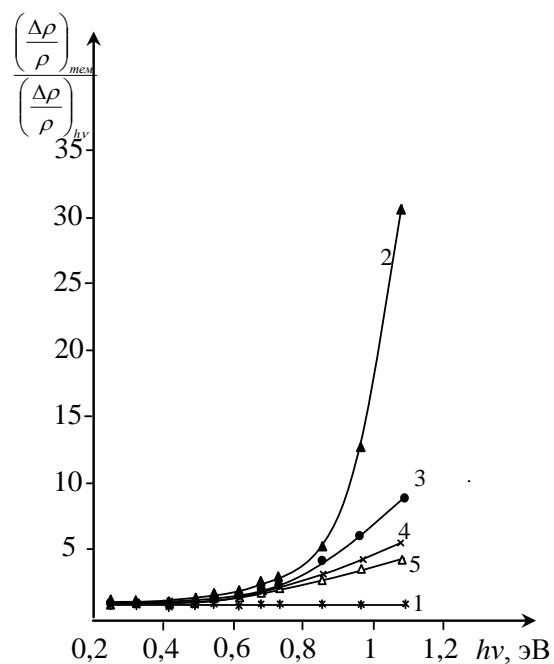
Тадқиқот натижалари шуни кўрсатдики, МаМҚ га ИҚ-нурланишнинг таъсири намунага қўйилган электр майдон қийматига кучли боғлиқ бўлар экан. Кичик электр майдон $E=1\div 20$ В/см қийматларида, электр майдони ИҚ-нурланишни МаМҚ га таъсирини кучайтирди, яъни МаМҚ ни сўниш эффекти кучайди ва ўзининг максимал қийматига $E=20\div 25$ В/см бўлганда эришди. Айтиш мумкин, электр майдони МаМҚ ни ИҚ-нурланиш таъсирида сўнишини кучайтирар экан. Электр майдонининг қиймати янада орттирилганда тескари эффект кузатилди, яъни электр майдонини ошиши билан ИҚ-нурланиш таъсири кучсизланиб сўниш эффекти секинлашди. Электр майдонининг қиймати $E\geq 150$ В/см бўлганида барча тадқиқ қилинаётган спектр соҳаларда МаМҚ нинг сўниш эффектини йўқолишига олиб келди.

Шундай қилиб, катта электр майдон кучланганлигининг $E>20$ В/см қийматларида таъсири ИҚ-нурланишни таъсирига қарама-қарши бўлиб, уларни ўзаро тўлиқ компенсацияси $E=150$ В/см бўлганида кузатилди. Бу физик ҳодиса p -турдаги барча намуналарда кузатилди. Ферми сатҳи кремнийнинг тақиқланган соҳасини ўртаси томонга силжиши билан намуналарда электр майдон кучланганлиги ва ИҚ-нурланишни ўзаро таъсир этиш тавсифи ўзгармайди, лекин стимуловчи электр майдон кучланганлиги катталиги нисбатан кичик қийматлар томонга силжиди.



1- $F=E_V+0,35$ эВ, 2- $F=E_V+0,37$ эВ, 3- $F=E_V+0,44$ эВ,
4- $F=E_V+0,48$ эВ, 5- $F=E_C-0,44$ эВ.

ба-расм. Ферми сатҳлари турли қийматларида бўлган Si<B,Mn> намуналарда МаМҚ нинг сўниш даражасини спектрга боғлиқлиги. $E=20$ В/см, $B=1,7$ Тл, $T=300$ К.



1-2 В/см, 2-20 В/см,
3-50 В/см, 4-80 В/см, 5-100 В/см.

бб-расм. Турли электр майдон кучланганликлари таъсирида МаМҚ сўниш даражасининг спектрга боғлиқлиги.

Қоронғиликда ва ИҚ нурларни $h\nu=0,45$ эВ; $0,62$ эВ; $0,85$ эВ энергиялари билан ёритилганликда МаМҚ ни ҳароратга боғлиқ ўзгариши 7-расмда кўрсатилган. Кўриниб турибдики, ИҚ- нурнинг таъсирида $\frac{\Delta\rho}{\rho}(T)$

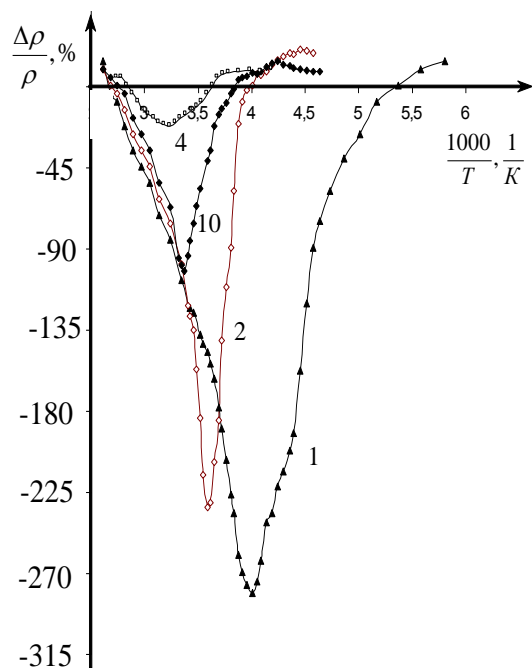
боғланишни сезиларлича ўзгартириш мумкин экан. Бу ўзгаришлар асосан қуйидаги моментлардан иборат бўлади. Тажриба маълумотларининг таҳлили асосида қуйидагилар аниқланди:

1. МаМҚ нинг максимал қиймати кузатиладиган ҳарорат (T_{\max}) электр майдон таъсирида нисбатан юқориқ ҳарорат томонга силжиши кузатилди. Тушаётган ИҚ-нурланиш фотонларининг энергиясини қиймати қанча катта бўлса, ҳароратни силжиши шунча катта бўлади;

2. ИҚ-нурланиш фотонларининг энергиясини қиймати ортиши билан T_{\max} мос бўлган МаМҚ ни қиймати ҳам сезиларли камайди. Мисол учун $h\nu=0,85$ эВ $\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_{\max}$ бўлганда, ўзгариш 300 % дан 25 % гача, яъни 12 мартага камайди;

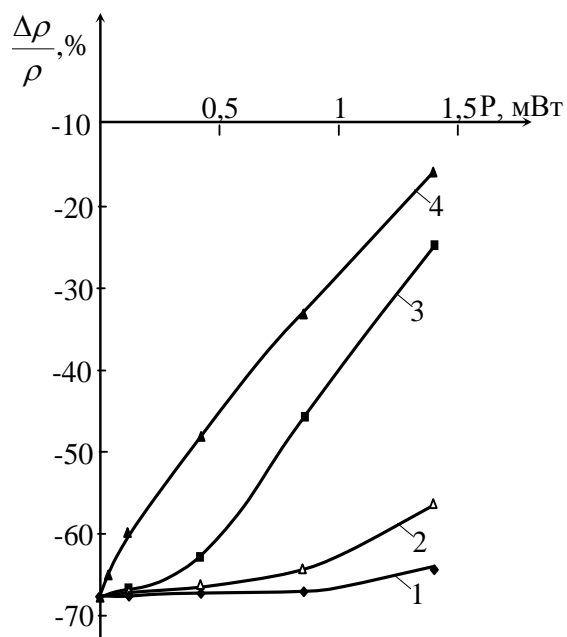
3. МаМҚ мавжуд бўладиган ҳарорат соҳаси тушаётган фотонларнинг энергиясини ортиши билан сезиларли даражада кичиклашди. Кичиклашиш асосан ҳароратни пастки чегарасини юқори томонга силжиши ҳисобига содир бўлди. МҚ ишорасини ўзгариши эса, юқориқ ҳароратларда рўй берди ва ИҚ-нурланишга сезиларли боғлиқ бўлмади.

8-расмда ИҚ-нурларнинг турли тўлқин узунлиги (λ) таъсири остида Ферми сатҳи $F=E_V+0,37$ эВ бўлган $\text{Si}\langle\text{В,Мп}\rangle$ намуналарда МаМҚ ни ИҚ-нурланиш қувватига боғлиқлиги кўрсатилган. Расмдан кўриниб турибдики, ИҚ-нурланиш интенсивлиги ошиши билан МаМҚ ни қиймати камайди. Масалан, $h\nu=1,08$ эВ энергияли ИҚ-нурланишни сезиш $P=0,03$ мВт дан бошланди. ИҚ-нурланиш қуввати $P=1,4$ мВт гача ошганда МаМҚ нинг қиймати 7 мартага камайди. Натижалар шуни кўрсатдики, МаМҚ ни ИҚ-нурланиш таъсирида ҳосил бўлиш чегараси тушаётган инфрақизил нурланиш фотонларнинг энергиясини камайиши билан катта қувватли нурланиш томонга силжир экан. Масалан фотонлар энергияси $h\nu=0,5$ эВ бўлганда ИҚ-нурланишни сезиши $P=0,4$ мВт дан бошланди.



1- қоронғиликдаги, 2- 0,45 эВ,
3- 0,62 эВ, 4-0,85 эВ

7-расм. Турли энергияли ИҚ-нурланиш фотонлари таъсирида Ферми сатҳи $F=E_V+0,37$ эВ бўлган $p\text{-Si}\langle\text{В,Мп}\rangle$ намунанинг МҚ гини ҳароратга боғлиқлиги, $V=1,7$ Тл.



1- 0,5 эВ; 2-0,62 эВ; 3- 0,85эВ; 4- 1,08 эВ

8-расм. Турли энергияли ИҚ-нурланиш фотонлари таъсирида Ферми сатҳи $F=E_V+0,37$ эВ бўлган $p\text{-Si}\langle\text{В,Мп}\rangle$ намунанинг МҚ гини монохроматик нурланиш интенсивлигига боғлиқлиги. $E=100$ В/см, $V=1,7$ Тл, $T=300$ К.

Ушбу маълумотлар, марганец атомлари нанокластерларига эга бўлган кремнийни функционал имкониятларидан яна бирини очади, яъни инфрақизил нур қуввати ёрдамида материалнинг магнит хоссасини сезиларли даражада бошқариш имконияти мавжудлигини кўрсатди.

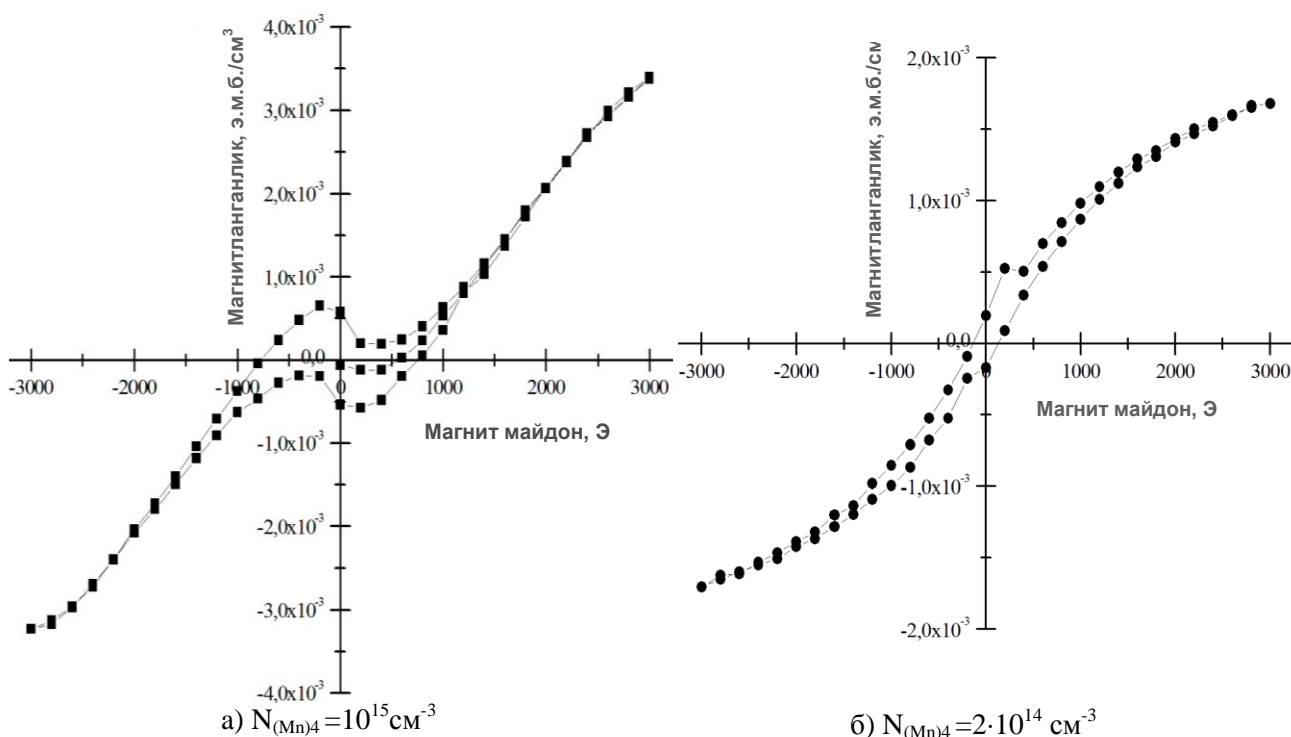
ИҚ-нурланиш билан намуналарга таъсир этиб, тўлқин узунлигига боғлиқ равишда МаМҚ нинг қийматини нафақат 30 мартадан кўпроқ камайтириш, балки ИҚ-нурланишнинг каттароқ қувватларида МҚ нинг ишорасини ўзгариши, яъни МҚ ни МаМҚ дан МуМҚ га ўзгартириш мумкин.

Таъриба натижалари асосида ИҚ-нурланишнинг тўлқин узунлигини ва электр майдонини оптимал қийматини танлаб, марганец атомлари билан легирланган кремний материалларнинг магнит хоссаларини мақсадли

бошқариш мумкинлиги аниқланди. Бу ўз навбатида марганец атомларининг нанокластерлари мавжуд кремний асосида нафақат ИҚ-соҳада ишловчи сезгир фотомагнит асбобларни яратиш имкониятларини очиб беради ҳамда янги илмий йўналиш ИҚ-спинтроникани ривожланишида ҳам катта ҳисса кўшади.

Диссертациянинг «**Кремнийни ферромагнит ҳолати ва тубдан янги асбобларни ишлаб чиқишда марганец атомларининг магнит нанокластерлари бўлган кремнийнинг функционал имкониятларидан фойдаланиш**» деб номланган олтинчи бобида, марганец атомлари билан легирланган *p*-турдаги кремнийни ферромагнит ҳолатини тадқиқ қилиш натижалари келтирилган. Ҳароратнинг $T=30$ К гача бўлган соҳаларида, максимал концентрациядаги ($N\sim 10^{15}$ см⁻³) магнит кластерларга эга бўлган кремний намуналарида ферромагнит ҳолат кузатилди.

Намуналарнинг магнит хусусияти паст ҳарорат соҳасида СКВИД (сверхпроводящий квантовый интерференционный датчик) –магнитометр қурилмасида тадқиқ қилинди. $T=30$ К ҳароратда, турли концентрациядаги марганец атомларининг нанокластерларига эга бўлган кремний намуналарининг магнитланганлиги ва магнит майдонга боғлиқлиги 9 - расмда кўрсатилган.



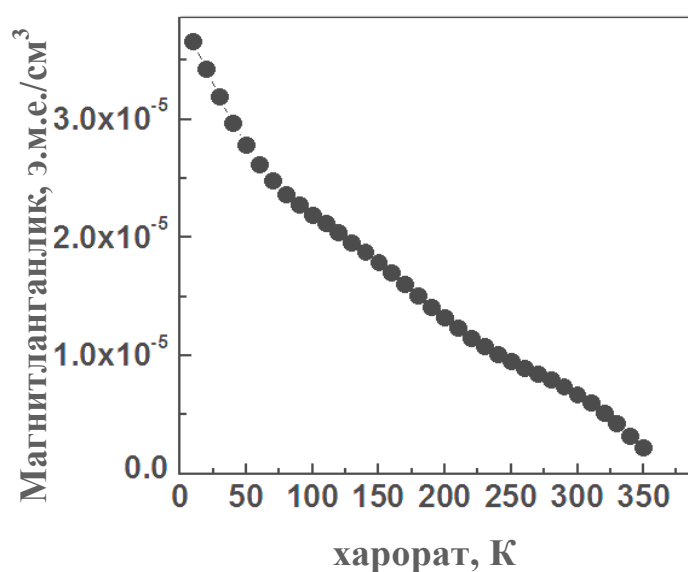
9-расм. Турли концентрациядаги марганец атомларининг нанокластерлари бўлган кремнийнинг магнитланганлигини магнит майдонга боғлиқлиги (гистерезис). $T=30$ К

Расмдан кўриниб турибдики, $T=300$ К да МаМҚ ни максимал қийматлари кузатилган намуналардаги магнитланишни паст ($T\leq 30$ К) ҳароратлар соҳасида магнит майдонга боғлиқлиги гистерезис ҳаракатига эга бўлди. Бу нанокластерга эга бўлган кремнийда ферромагнит ҳолат мавжудлигини тасдиқлайди (9а-расм). Нанокластерлар концентрацияси

камайиши билан магнитланганликни магнит майдонга боғлиқлигидаги гистерезисни табиати кучсизланди (9б- расм). $n\text{-Si}\langle\text{B,Mn}\rangle$ намуналарда бундай ҳодиса кузатилмади. Марганец атомларининг нанокластерларига эга бўлган кремнийни ферромагнит ҳолати ҳарорат ошиши билан кучсизланди ва $T\sim 40\div 50$ К да йўқолди. Тажриба маълумотлари асосида нанокластерларни магнит моменти ҳисобланди ва унинг қиймати $\mu = 800\mu_B$ га тенг бўлиб чиқди.

Тажриба натижаларидан кўриндики, ҳарорат ошиши билан, магнит нанокластерга $(\text{Mn})_4$ эга бўлган кремний намуналарининг магнитланишини ҳароратга боғлиқлиги чизикли камайди (расм 10.).

Олинган тажриба натижалари асосида шуни хулоса қилиш мумкинки, марганец атомларининг магнит нанокластерларини шаклланиши кремнийни магнит хоссаларига сезиларли таъсир кўрсатар экан.



10-расм. Магнит нанокластерли $(\text{Mn})_4$ кремнийни магнитланганлигини хароратга боғлиқлиги

Ҳароратнинг $T=230\div 330$ К оралиғида, кремний намуналардаги нанокластерларининг концентрация-сини бошқариб, ўта юқори МаМК ни олиш имкотиёти кўрсатилди. Ҳароратнинг паст $T<40$ К соҳасида, магнит нанокластерли кремний янги фаза ҳолатига ўтди ва ферромагнит ҳодисаси кузатилди.

Ҳароратнинг $T<40$ К соҳасида $p\text{-Si}\langle\text{B,Mn}\rangle$ намуналаридеги ферромагнетизм ҳодисаси, магнит нанокластерларни сезиларли магнит моментига эга бўлган $\left(s_{\text{Mn}4} = 4 \cdot \frac{5}{2} = 10\right)$ спинларининг

йўналтирилишини қайта ўзгариши билан тушунтириш мумкин. Биз томонимиздан кремнийни марганец билан легирлашнинг технологиясини янги усули ишлаб чиқилган бўлиб, уни асосида ва у $N=10^{16}\div 10^{17}$ см⁻³ гача марганец атомларининг магнит нанокластерига эга бўлган кремний намуналарини олиш имконини беради. Бундай намуналар хона ҳарорати шароитида МаМК қийматини нафақат ошириш имконини шунингдек, ферромагнит ҳолатни кузатилишининг ҳарорат соҳасини сезиларли кенгайтириш имконини беради.

Тадқиқотлар натижаларининг таҳлили куни кўрсатдики, нанокластерлар мавжуд бўлган кремний материаллари асосида спинтроника соҳасида тубдан янги юқори сезгирликга эга бўлган магнитодатчиклар ва фотоманит асбобларни яратиш мумкин экан.

Диссертация ишида натижаларни олишда, муҳокама қилишда ҳамда тайёрлашда амалий ёрдам берган устозимиз физика-математика фанлари

доктори, ЎзР Фа академиги Бахадирханов Мухаммед Кабир Саидхановичга катта рахмат айтмоқчиман.

ХУЛОСА

Кремнийнинг магнит хоссаларини унда шакллантирилган марганец атомларининг магнит хусусиятли нанокластерларининг концентрациясига ва электрофизик параметрларига боғлиқ равишда ҳароратнинг кенг соҳасида турли ташқи таъсирлар ёрдамида бошқаришни тадқиқ қилиш натижаси асосида қуйидаги хулосаларга келинди:

1. Наноэлектроника ва спинтроника материали сифатида янги физик хоссаларга эга бўлган магнит нанокластерли кремний олишнинг оптимал диффузион технология усули ишлаб чиқилди.

2. Кремний кристалл панжарасидаги марганец атомларини магнит нанокластерларининг ўлчамлари аниқланган ва уларни ўлчамларини 0,7 нм дан 1,4 нм гача бошқариш имконияти кўрсатилган.

3. Хона ҳароратида кремнийда марганец атомлари магнит нанокластерларининг концентрацияси 10^{15} см^{-3} бўлганда, манфий магнит қаршилиқнинг қийматини 300 % гача ортиши аниқланган.

4. Манфий магнит қаршилиқнинг қийматини, тушаётган интеграл (оқ) ёруғлиқ интенсивлигини 0-20 Лк оралиғида 100 мартагача ошириши кўрсатилган.

5. Манфий магнит қаршилиқ қийматини инфрақизил ёруғлиқни тўлқин узунлигига, ҳароратга ва электр майдон кучланганлиги билан боғлиқ ўзгариш қонуниятлари аниқланган.

6. Ҳароратнинг 30 К дан паст соҳасида, марганец атомлари магнит нанокластерларининг концентрацияси $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ дан ортиқ бўлган кремнийда ферромагнит хусусият намоён бўлиши аниқланган.

7. Ферми сатҳини ҳолатига боғлиқ равишда манфий магнит қаршилиқни 120-370 К ҳарорат оралиғи чегарасида кузатиш мумкинлиги аниқланган.

8. Магнит нонокластерли кремнийда юқори ҳароратли катта манфий магнит қаршилиқ кузатилишига локализацияланган заряд ташувчиларнинг ташқи электр ва магнит майдон таъсирида ўтказувчанликда иштирок этиши билан боғлиқ бўлган физик механизм таклиф қилинган.

9. Марганец атомлари билан легирланган Si<B,Mn> n-турдаги кремнийда ҳам ҳароратнинг 120-190 К интервал оралиғида, максимал қиймати 35 % гача бўлган манфий магнит қаршилиқ кузатилган.

10. Марганец атомларининг магнит нанокластерларига эга кремний асосида, ҳароратни 200÷360 К гача бўлган оралиғида ишловчи сезгирлиги юқори бўлган фотомагнит, магнит, ҳароратни ўлчовчи ва куп функцияли датчикларни яратиш имкониятлари кўрсатилган.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.27.06.2017.FM/Т.34.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ,
ИНСТИТУТЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ,
САМАРКАНДСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

**ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени ИСЛАМА КАРИМОВА**

МАВЛОНОВ ГИЁСИДДИН ХАЙДАРОВИЧ

**УПРАВЛЕНИЕ МАГНИТНЫМИ СВОЙСТВАМИ КРЕМНИЯ
С НАНОКЛАСТЕРАМИ ПРИМЕСНЫХ АТОМОВ**

01.04.10 - физика полупроводников

**АВТОРЕФЕРАТ ДОКТОРСКОЙ (DSc) ДИССЕРТАЦИИ
ПО ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИМ НАУКАМ**

Ташкент – 2018

Тема диссертации доктора (DSc) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за B2017.1.DSc/FM79.

Диссертация выполнена в Ташкентском государственном техническом университете имени Ислама Каримова.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице по адресу fti.uz и на Информационно-образовательном портале «ZiyoNet» по адресу www.ziyo.net.

Научный консультант: **Илиев Халмурат Миджитович**
доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Рембеза Станислав Иванович**
доктор физико-математических наук, профессор

Зайнобиддинов Сирожиддин
доктор физико-математических наук, профессор

Камалов Амангелди Базарбаевич
доктор физико-математических наук, доцент

Ведущая организация: **Ташкентский университет информационных технологий**

Защита диссертации состоится «___» _____ 2018 года в ___ часов на заседании Научного совета DSc.27.06.2017.FM/T.34.01 при Физико-техническом институте, Институте Ионно-плазменных и лазерных технологий, Самаркандском государственном университете по адресу: 100084, г.Ташкент, ул. Бодомзор йули, 2б. Административное здание Физико-технического института, зал конференций. Тел./Факс: (+99871) 235-42-91, e-mail: info.fti@uzsci.net.

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Физико-технического института (зарегистрирована за № _5_). Адрес: 100084, г.Ташкент, ул. Бодомзор йули, дом 2б. Административное здание Физико-технического института, зал конференций Тел./Факс: (+99871) 235-30-41.

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2018 г.
(протокол рассылки № _5_ от «___» _____ 2018 г.)

С.А. Бахрамов
Председатель Научного совета по присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н., академик Ан УзР

А.В. Каримов
Ученый секретарь Научного совета по присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

И.Г. Атабаев
Председатель научного семинара при Научном совете по присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация докторской (DSc) диссертации)

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время в области физики полупроводников одними из перспективных направлений является исследование и разработка способов управления магнитными свойствами полупроводниковых материалов и получение на их основе больших интегральных схем, элементов с магнитными свойствами, сенсоров с магнитными сопротивлениями, магнитных датчиков нового типа, фотомагнитных приборов, а также их совершенствованию. В этом аспекте создание и исследование магнитных нанокластеров в кристаллической решетке кремния, без существенного нарушения его кристаллической решетки и фазового состава, управление их магнитными свойствами является одним из важных задач нанoeлектроники и промышленной электроники.

На сегодняшний день в мире уделяется большое внимание созданию нанокластеров с магнитными свойствами в сплавах и гетероструктурах с помощью ионной имплантации, радиационного излучения эпитаксиального наращивания, а также химическими способами. В сфере реализации целевых научных исследований, в том числе научных изысканий, одним из важнейших задач являются: разработка способа получения магнитного наноструктурного материала за счет формирования магнитных нанокластеров атомов марганца в решетке кремния с помощью низкотемпературного поэтапного диффузионного легирования; определение структуры, размера и магнитного момента нанокластера, а также магнитной восприимчивости и намагниченности кремния, содержащего такие нанокластеры; управление магнитными свойствами кремния с магнитными нанокластерами в зависимости от их концентрации и электрофизических параметров в широком интервале температур при различных внешних воздействиях; определение ферромагнитного перехода кремния в низкотемпературной области.

В соответствии со Стратегией действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан особое внимание уделяется вопросам стимулирования научно-исследовательской и инновационной деятельности, созданию эффективных механизмов прикладного применения достижений научно-инновационной деятельности. В годы поддержки активного предпринимательства, инновационных идей и технологий, нацеленных на получение научных результатов, отвечающих современным требованиям, на научное развитие обращается особое внимание. В этом аспекте были созданы новые виды полупроводниковых приборов, датчиков освещения, давления и влажности, высоковольтные и частотные диоды, детекторы на основе новых методов образования наноструктур на поверхности полупроводниковых материалов, новые методы легирования кремния редкоземельными элементами (гадолиний, европий, гольмий и самарий), имеющими большую растворимость. Одной из актуальных проблем сегодняшнего дня является формирование нанокластеров с магнитными особенностями с управляемыми

электрофизическими параметрами по всему объему материала и за счет их управление магнитными свойствами материалов.

Данное диссертационное исследование в определенной степени служит выполнению задач, предусмотренных в Указе Президента: № УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» от 7 февраля 2017 года и в Постановлениях Президента № ПП-2772 «О мерах по дальнейшему совершенствованию управления, ускоренному развитию и диверсификации электротехнической промышленности на 2017 – 2021 гг.» от 13 февраля 2017 года и № ПП-2789 «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательской деятельности» от 17 февраля 2017 года, а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Настоящая работа выполнена в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий Республики Узбекистан III. «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение, транспорт, машино - и приборостроение» и имеет важную значимость для развития современной электроники, микроэлектроники, фотоники, спинтроники, электронного приборостроения.

Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации¹.

Научные исследования в области магнитных свойств материалов проводятся в ведущих научных центрах, в высших образовательных учреждениях в том числе: в Токийском университете (Япония), Флоринском университете (США), Небраска - Линкольнском университете (США), Юонсиском университете (Ю. Корея), Квантофункциональном исследовательском центре (Ю. Корея), Куюнпокском национальном университете (Ю. Корея), Лильском научном и технологическом университете (Франция), Лондонском нанотехнологическом центре (Англия), Мурсинском университете (Испания), Китайском технологическом университете (КНР), Московском государственном университете (Россия), Физико-техническом институте (Санкт-Петербург, Россия), Воронежском государственном университете (Россия), Физико-техническом институте (Украина), Национальном университете Узбекистана (Узбекистан), Самаркандском государственном университете (Узбекистан).

В Кванто-функциональном исследовательском центре (Ю. Корея) был исследован переход полупроводниковых материалов в ферромагнитное состояние в области низких температур, в университете Dalhousie в результате исследования кристалла Al-Pd-Mn-B наблюдали магнитосопротивление, в Калифорнийском технологическом институте

¹ Negative magnetoresistance in Mn-doped p-CdSb under pressure // Journal of Alloys and Compounds. 2017. 699. p.1104-1107., Negative magnetoresistance of heavily doped silicon p-n junction// Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics, 2011.V.14,N1.p. 88-90. Negative magnetoresistance in ultrananocrystalline diamond: strong or weak localization // Appl. Phys. Lett. 2008. 92. pp 012120., Classical origin for a negative magnetoresistance and for its anomalous behavior at low magnetic fields in two dimensions//Revista Mexicana De Física 2006. S 52 №3. C.185-189.

(США) и в микроэлектронном технологическом центре Jet Propulsion (Калифорния, США) исследованы тонкие слои $\text{La}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$, имеющие магнитные особенности, а также в Монтпеллерском университете (Франция) исследовано образование отрицательного магнитосопротивления с добавлением AlAs-GaAs в кремний. В Парижском судебном университете (Франция) и Научно-исследовательском Институте физики твердого тела (Германия), раскрыты возможности записи и хранения информации на жестких дисках с использованием эффекта «гигантского» магнитосопротивления в мультислоях, состоящих из железа и хрома.

В настоящее время в мире ведутся ряд исследований для создания технологий получения полупроводников с магнитными особенностями и изучению их магнитных свойств по следующим направлениям: создание магнитоструктурных материалов для развития спинтроники; возможности наблюдения сверхвысокого магнитосопротивления при комнатной температуре; создание сенсоров с магнитосопротивлением и повышение их чувствительности; создание высокочувствительных магнитодатчиков и других магниточувствительных полупроводниковых приборов на основе кремния, а также повышение их стабильности по отношению к температуре.

Степень изученности проблемы. В последнее время достаточно интенсивно изучаются возможности формирования магнитных нанокластеров примесных атомов в полупроводниках и использования их свойств для создания датчиков. В работах авторов Т.И. Воронина, Т.С. Лагунова, М.П. Михайлова, К.Д.Моисеева, А.Ф. Липаева, Ю.П. Яковлева посвящена исследованию транспортных свойств гетероструктур GaInAsSb/InAs:Mn, выращенных на подложках, легированных магнитной примесью Mn с высокой концентрацией ($p > 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$), при этом обнаружены аномальный эффект Холла и отрицательное магнитосопротивление, обусловленные обменным взаимодействием ионов Mn в InAs с высокоподвижными электронами в канале на гетерогранице.

В работе авторов А.Д. Таланцева, О.В.Коплака, Р.Б. Моргунова обнаружено влияние концентрации дырок на ферромагнетизм кластеров MnSb в пленках GaMnSb. Высокая концентрация дырок приводит к их туннелированию сквозь барьер Шоттки на границе кластер–кристаллическая решетка и изменению намагниченности кластеров. Микроволновое сопротивление пленок зависит от спиновой поляризации дырок, управляемой намагниченностью кластеров и внешним магнитным полем. В работах российского профессора С.И. Рембезы систематизированы и обобщены результаты исследований физических свойств примесей и дефектов в кристаллической решетке полупроводников, проведенных методами электронного парамагнитного и ядерного магнитного резонансов.

В работах академика М.К. Бахадирханова предложены основы формирования кластеров примесных атомов, как нового состояния атомов в полупроводниках, изучены электрофизические, фотоэлектрические и

магнитные свойства кремния с нанокластерами примесных атомов с различной природой.

В работах авторов G.W. Ludwig, H.H. Woodbury и в работах авторов J.Kreissl, W.Gehlhoff, а также Узбекистанских ученых К.П. Абдурахманова, С. Зайнабидинова, Т.С. Камилова, Ш.Б. Утамурадова было показано, что в кремнии, легированном марганцем, при медленном охлаждении после диффузии обнаружены нанокластеры, состоящие из 4-х атомов марганца.

Однако управление скоростью охлаждения не позволило получить образцы с воспроизводимыми параметрами, в месте с тем практически не изучены состав, структура, размер, магнитный момент нанокластеров и электрофизические свойства Si с такими же наноструктурами.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнялась на кафедре «Цифровая электроника и микроэлектроника» ТашГТУ согласно программе государственных грантов: Ф2-47 «Исследование физических основ формирования ферромагнитного состояния кремния с магнитными кластерами» (2012-2016), Ф2-44 «Исследование механизма самоорганизации примесных атомов в полупроводниках и управление их параметрами» (2012-2016), а также текущего гранта Ф2-55 «Разработка научных основ получения объемнонаноструктурированного кремния на основе формирования нанокластеров примесных атомов как нового класса наноматериалов с уникальными функциональными возможностями» (2017-2020 гг.).

Целью исследования является управление магнитными свойствами кремния с магнитными нанокластерами в зависимости от их концентрации и электрических параметров в широком интервале температур при различных внешних воздействиях.

В соответствии с поставленной целью необходимо было решить следующие задачи:

разработать способ получения магнитного наноструктурного материала за счет формирования магнитных нанокластеров атомов марганца в решетке кремния с помощью низкотемпературного поэтапного диффузионного легирования;

исследовать возможности управления магнитосопротивлением кремния с магнитными нанокластерами в широком интервале температуры, электрического и магнитного полей;

определить закономерности изменения магнитосопротивления кремния с магнитными нанокластерами в зависимости от концентрации нанокластеров;

исследовать особенности фотомангнитных свойств кремния с магнитными нанокластерами как при фоновом, так и при ИК области спектра освещения;

исследовать отрицательное магнитосопротивление при одновременном приложении различных внешних воздействий (температура, электрическое

поле и освещение);

научно обосновать и показать возможность получения ферромагнитного кремния путем формирования в нем магнитных кластеров.

определить на основе экспериментальных результатов магнитный момент нанокластера, а также магнитную восприимчивость и намагниченность материала, содержащего такие нанокластеры;

Объектом исследования является монокристаллический кремний марки КДБ - 2, 3, 5, 10, 100. В качестве примеси был выбран марганец, являющийся парамагнитным атомом, который обладает электронной структурой $3d^5 4s^2$ со спином $s = \frac{5}{2}$.

Предметом исследования является процесс формирования магнитных нанокластеров атомов марганца, равномерно распределенных в кристаллической решетке кремния.

Методы исследований. Современными методами электронного парамагнитного резонанса и атомной силовой микроскопии, а также рентгеноструктурного анализа исследовано состояние атомов марганца в решетке кремния.

Фотомагнитные свойства образцов исследовались на специально созданной установке на основе инфракрасного спектрометра ИКС-21 (Инфракрасный спектрометр) и электромагнита, позволяющего варьировать электрическое и магнитное поля, температуру, а также длину волны ИК излучения и его мощность.

Ферромагнитное состояние таких образцов в области низких температур исследовалось на установке СКВИД (сверхпроводящий квантовый интерференционный датчик) – магнитометр. (Результат творческого сотрудничества с коллективом Кванто-функционального исследовательского центра полупроводников, университета Dongguk, Сеул, Южная Корея).

Научная новизна исследования заключается в следующем:

оптимизирован низкотемпературный поэтапный способ диффузионной технологии, позволяющий формировать нанокластеры атомов марганца с магнитными свойствами по всему объему решетки кремния с управляемыми распределением и параметрами;

предложен способ повышения термостабильности параметров кремния, легированного атомами марганца при высоких температурах за счет формирования нанокластеров атомов марганца;

установлено высокое отрицательное магнитосопротивление в кремнии при комнатной температуре за счет увеличения концентрации магнитных нанокластеров атомов марганца до 10^{15} см^{-3} ;

определено линейное увеличение отрицательного магнитосопротивления в кремнии с магнитными нанокластерами атомов марганца с ростом индукции магнитного поля;

определен эффект погашения отрицательного магнитосопротивления до 100-кратного значения за счет уменьшения кратности зарядового состояния

нанокластеров, имеющей мощный магнитный момент и заряд при воздействии интегрального и инфракрасного освещения.

определен переход в ферромагнитное состояние кремния при низких температурах 30 К за счет упорядочения ориентации спинов магнитных нанокластеров (Mn)₄, обладающих магнитным моментом;

произведен расчет магнитного момента нанокластеров атомов марганца с использованием значения намагниченности кремния (χ_{Mn}), определенного из экспериментальных результатов в области низких температур ($T=10$ К);

определено линейное уменьшение намагниченности кремния с повышением температуры за счет разупорядочения спинов нанокластеров с повышением (kT) энергии;

показана возможность управления величиной отрицательного магнитосопротивления до 6 раз при 240 К в широкой области напряженного электрического 0,1 ÷ 600 В/см и магнитного 0,2 - 2 Тл полей.

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

Разработана технология получения кремния с наноструктурами атомов марганца по всему объему кристалла.

Разработан способ повышения значения отрицательного магнитосопротивления за счет увеличения концентрации нанокластеров в составе кремния. Это, в свою очередь, даёт возможность производить высокочувствительные магнитодатчики на основе кремния с магнитными нанокластерами.

Разработан способ повышения устойчивости к высоким температурам электрофизических параметров кремния, легированного атомами марганца за счет стабильности к температуре нанокластеров атомов марганца. Это также предоставляет возможность получать наноструктуры, стабильные к высоким температурам в кремнии, а также производить высокочастотные диоды, стабильные к высоким температурам и напряжениям.

Определены возможности управления величиной высокотемпературного отрицательного магнитосопротивления с помощью внешнего воздействия (температуры, освещенности, электрического поля) и показана реальность создания функциональных датчиков, измеряющих физические величины на основе полученных результатов.

Достоверность результатов исследований определения строения нанокластеров атомов марганца в решетке кремния основывается на применении электронного парамагнитного резонатора с интегральной чувствительностью прибора, составляющая $\sim 5 \cdot 10^{10}$ спин/Гц, с точностью установления до 0,001%, современного атомного силового микроскопа и методов рентгеноструктурного анализа, а также использовании эффекта Холла для определения электрофизических свойств полученных материалов и СКВИД магнитомерной установки для определения ферромагнитного состояния кремния.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследования заключается в объяснении физических механизмов формирования магнитных нанокластеров атомов марганца в решетке кремния, физическом обосновании обнаруженного эффекта высокотемпературного аномально высокого ОМС, доказательстве возможности управления его величиной с помощью внешних воздействий, а также в изучении свойств кремния с магнитными нанокластерами, как нового класса фотомагнитных материалов.

Практическая значимость результатов исследований заключается в том, что на основе кремния с нанокластерами атомов марганца можно разработать высокочувствительные магнитные и фотомагнитные приборы, многофункциональные датчики физических величин, а также получить ферромагнитный кремний.

Внедрение результатов исследований.

На основе результатов исследования управления магнитными свойствами кремния с магнитными нанокластерами в зависимости от их концентрации и электрических параметров в широком интервале температур при различных внешних воздействиях:

технология «низкотемпературного и поэтапного легирования» кремния была использована открытым акционерным обществом «FOTON» при получении кристаллов кремния с ферромагнитным свойством (Справка №02/2074 акционерной компании «Узэлтехсаноат» от 6 октября 2017 года). Использование научных результатов позволило повысить стабильность высокочастотных диодов к внешним воздействиям;

результаты по управлению нанокластерных зарядов под воздействием интегрального и инфракрасного освещения были использованы в Институте солнечной энергии Академии наук Туркменистана в рамках международного гранта «Разработка и изготовление принципиально новых фотоэлементов с широкой спектральной чувствительностью (0,1÷3 мкм) на основе кремния с нановаризонными структурами» (Справка № 162/17 Института солнечной энергии АНТ от 9 ноября 2017 года). Использование научных результатов позволило расширить спектральную чувствительность металло – полупроводниковых структур спектротрических элементов в длинно - волновую сторону;

порядок проведения низкотемпературной и поэтапной диффузии примесей с низкими активационными энергиями включал диффузию примесных атомов бора и алюминия на активном участке кристаллов карбида кремния. Работа выполнена (2012-2016 гг) в проекте № ПФИ ФЗ-ФА-0-56434 на тему «Физические закономерности формирования тонкопленочных структур и структур с нановключениями для солнечных элементов и полупроводниковых приборов» (справка ФТА-02-11/940 от агентства по науке и технологиям Республики Узбекистан от 24 октября 2017 года). Использование научных результатов позволило получить тонкослойные экспериментальные образцы.

Апробация результатов исследования. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 8 международных и республиканских научно-практических конференциях.

Публикации результатов исследований. По материалам диссертации опубликовано 33 научные работы, из них - 2 монографии, 13 статей в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертационных работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации 200 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, определена связь исследований с основными приоритетными направлениями развития науки и технологии, приведен обзор международных научных исследований по теме диссертации и степень изученности проблемы. Проведен анализ состояния проблемы и обоснована актуальность темы исследования, научная новизна направления, изложены цель работы и основные задачи для решения данной проблемы, научная и практическая ценность проведенного исследования.

В первой главе **«Магнитные свойства полупроводниковых материалов»** сделан литературный обзор. Представлены самые последние данные по исследованию отрицательного магнитосопротивления (ОМС) и положительного магнитосопротивления (ПМС) в различных полупроводниковых материалах и структурах, их значимость, а также представлены их физический механизм и условия получения ферромагнитных материалов.

Во второй главе **«Разработка технологии изготовления образцов кремния с магнитными нанокластерами и определение их электрофизических свойств»** приводится оптимальный способ получения магнитного наноструктурированного материала за счет формирования магнитных нанокластеров атомов марганца в решетке кремния с помощью низкотемпературного поэтапного диффузионного легирования, а также методика проведения экспериментов.

Сущность данного способа легирования заключается в проведении диффузии поэтапно, с определенной скоростью повышения температуры. Показано, что этот способ не только позволяет осуществить максимальное участие введенных атомов в формировании нанокластеров, но также обеспечивает равномерное распределение магнитных нанокластеров по всему объему материала. Это дает полное основание считать, что экспериментальные значения энергии активации диффузии и соответственно температурная зависимость диффузии $D = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)$, а также растворимость примесей, полученных на основе высокотемпературной диффузии, нельзя использовать в условиях низкотемпературной диффузии, процесс диффузии при этом существенно ускоряется, что полностью подтверждает предположение о вынужденной диффузии примесных атомов по междоузлиям.

Исследовано состояние атомов марганца, введенных по новой технологии в решетку кремния современными методами электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) и атомной силовой микроскопии (АСМ), а также рентгеноструктурным анализом.

Природа состояния атомов марганца в решетке кремния исследовалась с помощью спектров ЭПР на установке «Broker» при $T=77$ К. Для регистрации спектров ЭПР использовался спектрометр, работающий в 3-х сантиметровом

диапазоне длин волн. Интегральная чувствительность прибора составляла $\sim 5 \cdot 10^{10}$ спин/Гс, а точность установления - до 0,001%. Точное определение g -фактора наблюдаемого спектра осуществлялось по линии маркера с $g=2,0024$.

Как показали результаты полученных по новой технологии исследований в образцах p -Si<B,Mn>, в которых уровни Ферми находились в пределах $E_F=E_V+(0,38 \div 0,45)$ эВ, четко наблюдаются сверхтонкие спектры ЭПР, состоящие из 21 линии (рис. 1а), характерные для нанокластеров, содержащих в своем составе четыре атома марганца. Эти результаты являются прямым доказательством образования магнитных нанокластеров примесных атомов в решетке кремния. Со смещением уровня Ферми от $E_F=E_V+(0,38 \div 0,45)$ к середине запрещенной зоны $F=E_V+(0,52 \div 0,55)$ эВ наблюдаются спектры ЭПР, интенсивность которых ослабляется за счет уменьшения концентрации атомов в состоянии Mn^{++} и, соответственно, увеличения концентрации атомов в состоянии Mn^+ .

В результате творческого сотрудничества с коллективом исследовательского центра полупроводников Кванто-функционального исследовательского центра полупроводников, университета Dongguk, Сеул, из Южной Кореи, нами были подготовлены образцы кремния с магнитными нанокластерами. Нашими коллегами был проведен структурный анализ образцов Si, легированного Mn с использованием рентгеновского дифрактометра (РД). На рис. 2 приведены дифракционные пики Si (111), показывающие комплексы бор- марганца (Mn_4B).

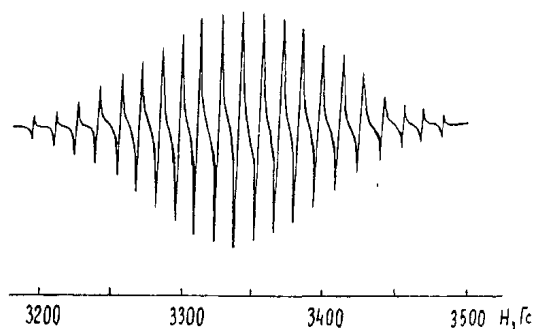


Рис. 1 а. Спектр ЭПР нанокластера, состоящего из 4-х атомов марганца в кремнии

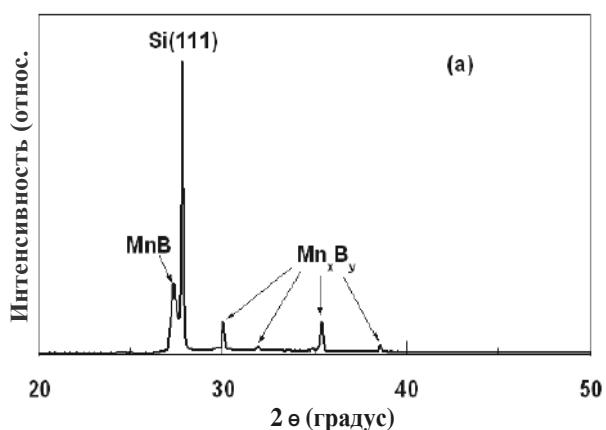


Рис. 1 б. Рентгенографическое изображение магнитных кластеров

Оптимальные термодинамические условия позволяют получить минимальную потенциальную энергию нахождения кластера в решетке кремния. На основе расчета, с учетом кулоновского взаимодействия атомов марганца между собой и взаимодействия между атомами марганца и бора был определен оптимальный размер нанокластеров, который составляет от 0,7 нм до 1,4 нм.

Таким образом, экспериментально доказано, что в условиях низкотемпературной диффузии не только возможно получение образцов кремния без эрозии поверхности, без образования силицидов в приповерхностной области, но и возможно равномерное легирование образца с необходимой концентрацией и заданной глубиной.

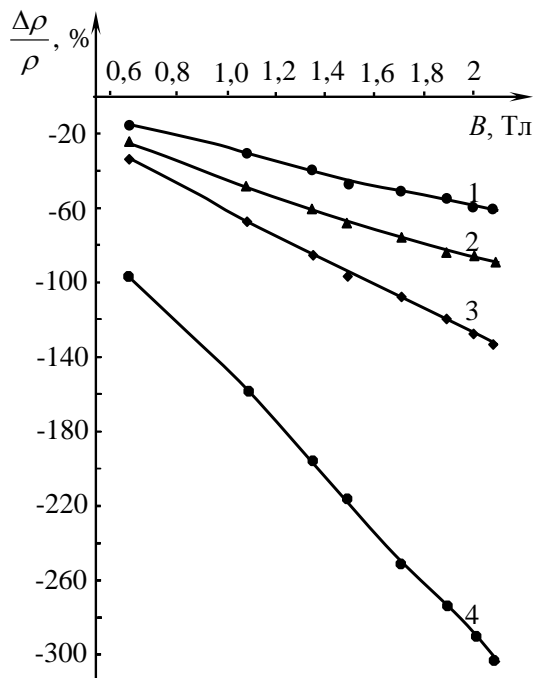
В третьей главе «**Магнитосопротивление в кремнии с магнитными нанокластерами атомов марганца и кремния, легированного марганцем без нанокластеров**» приводятся ряд оригинальных результатов исследования магнитосопротивления в образцах *p*-типа кремния с магнитными нанокластерами атомов марганца и перекомпенсированных образцов *n*-типов, а также в образцах *p*-типа без нанокластеров. При этом особое внимание было уделено зависимости магнитных свойств кремния от величины магнитного поля и вкладу магнитных нанокластеров в появление ОМС, а также определению температурной области существования эффекта отрицательного магнитосопротивления (ОМС).

Для исследования вклада магнитных нанокластеров в ОМС были изготовлены образцы с одинаковым удельным сопротивлением, но с различной концентрацией нанокластеров. Результаты показывают, что с ростом концентрации магнитных нанокластеров, значение ОМС существенно увеличивается (рис. 2а). В образцах с концентрацией нанокластеров $N=10^{15}$ см⁻³ при комнатной температуре и при $E=100$ В/см получается большое ОМС, которое достигает $\Delta\rho/\rho\sim 300$ %, а чувствительность магнитного поля составляет $\alpha=150$ %/Тл.

Эти результаты не только доказывают, что появление ОМС и его природа в таких образцах непосредственно связана с наличием нанокластеров атомов марганца в решетке кремния, но и с возможностью управления значением ОМС в широком интервале путем изменения концентрации нанокластеров. Установлено, что с ростом концентрации нанокластеров в интервале $2\cdot 10^{13}\div 10^{15}$ см⁻³ при одинаковых условиях эксперимента значение ОМС увеличивается в $8\div 10$ раз, а чувствительность к магнитному полю повышается от $\alpha=28$ %/Тл до $\alpha=150$ %/Тл. Разработанная усовершенствования технология позволяет получать нанокластеры с концентрацией до $N=10^{17}$ см⁻³. При этом можно ожидать, что в таких образцах значение ОМС будет на 1,5 порядка больше, чем в имеющихся образцах.

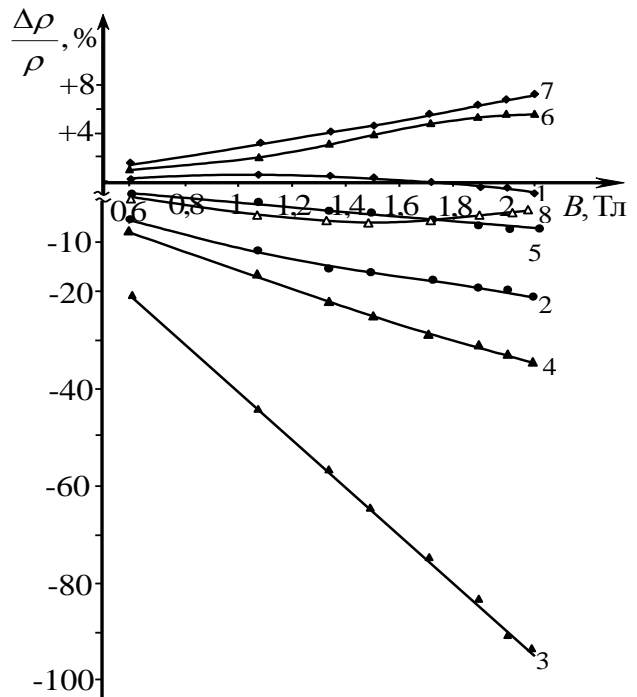
На рис. 2б представлено исследование влияния магнитного поля на МС в образцах с нанокластерами *p*-Si<В,Мn> с положением уровня Ферми $F=E_V+0,29\div E_V+0,48$ эВ и перекомпенсированных образцах *n*-Si<В,Мn> с $F=E_C-(0,35\div 0,54)$ эВ. В образцах *p*-типа с положением уровня Ферми $F\leq E_V+0,28$ эВ всегда имеет место незначительное положительное магнитосопротивление (ПМС), величина которого слабо зависит от магнитного поля. Со смещением уровня Ферми к $F\geq E_V+0,29$ эВ в использованных образцах при низких значениях магнитного поля наблюдается незначительное ПМС, значение которого с ростом магнитного

поля уменьшается, а при $B \geq 1,8 \div 1,9$ Тл знак магнитосопротивления меняется, т.е. ПМС переходит в ОМС (рис. 2б, крив.1). Многочисленные эксперименты показали, что если пороговое значение уровня Ферми будет равно $F \sim E_V + 0,29$ эВ, то проявляется эффект ОМС. Смещение уровня Ферми в образцах кремния с магнитными нанокластерами атомов марганца от $F \sim E_V + 0,29$ эВ в сторону середины ширины запрещенной зоны приводит к усилению эффекта ОМС (рис. 2б кривые 2, 3), а значение ОМС растет с увеличением магнитного поля.



1- $N_{(Mn)4} = 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, 2- $N_{(Mn)4} = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$,
3- $N_{(Mn)4} = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, 4- $N_{(Mn)4} = 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Рис. 2а. Зависимость ОМС от магнитного поля в образцах с различной концентрацией магнитных нанокластеров при $T=300$ К, $E=100$ В/см



Образцы *p*-типа: 1- $F = E_V + 0,28$ эВ,
2- $F = E_V + 0,32$ эВ, 3- $F = E_V + 0,385$ эВ, 4- $F = E_V + 0,434$ эВ, 5- $F = E_V + 0,48$ эВ. Образцы *n*-типа: 6- $F = E_C - 0,45$ эВ, 7- $F = E_C - 0,384$ эВ. Образцы *p*-типа, без нанокластеров: 8- $F = E_V + 0,385$ эВ

Рис. 2б. Зависимость МС от магнитного поля в образцах *p*-Si<В,Мn>и *n*-Si<В,Мn> при различных положениях уровня Ферми при $E=100$ В/см, $T=300$ К

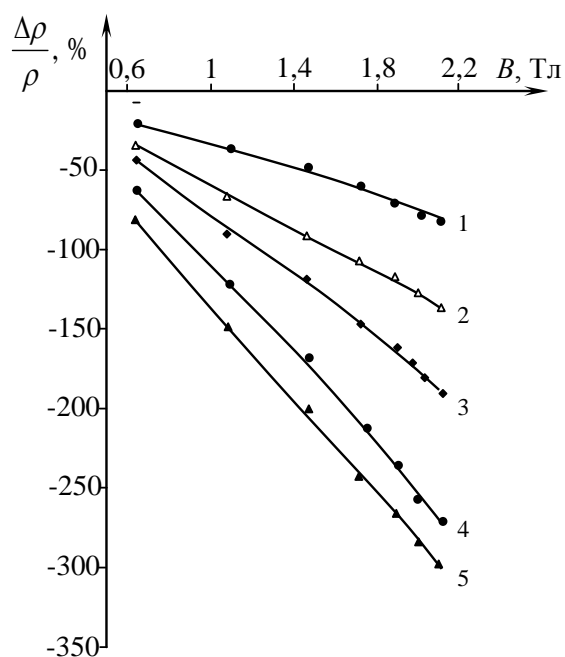
Максимальное значение ОМС наблюдается в образцах с положением уровня Ферми $F \sim E_V + 0,375 \div E_V + 0,385$ при $T=300$ К. В перекомпенсированных образцах при комнатной температуре, независимо от положения уровня Ферми, всегда наблюдается небольшое ПМС (рис. 2б кривые 6, 7). Со смещением уровня Ферми от зоны проводимости к середине запрещенной зоны значение ПМС увеличивается практически линейно и составляет от 2,5 % до 7 %. При понижении температуры значение ПМС медленно уменьшается, а при $T \sim T_{\text{порог}}$ ($T_{\text{порог}}$ – температура появления ОМС) происходит инверсия знака МС, т.е. ПМС переходит к ОМС. Со смещением уровня Ферми от середины запрещенной зоны к зоне проводимости

наблюдается переход от двукратно заряженных состояний атомов марганца к однократно заряженным состояниям с максимальным значением ОМС 35 % в образцах $F=E_C-0,37$ эВ при $T=150$ К. В перекомпенсированных образцах наличие ОМС должно определяться спином атомов марганца $S=5/2$ и их зарядовым состоянием.

Установлено, что максимальное ОМС наблюдается в образцах с положением уровня Ферми $F=E_V+(0,375\div 0,385)$ эВ. Определены закономерности изменения отрицательного магнитосопротивления от положения уровня Ферми.

Как видно из рис. 3а, с уменьшением температуры значение ОМС увеличивается, но при этом сохраняется его линейная зависимость $\frac{\Delta\rho}{\rho}(B)$ от роста магнитного поля.

На основе полученных данных по исследованию МС, как в компенсированных, так и в перекомпенсированных образцах, была определена температурная область существования как ОМС, так и ПМС (рис. 3б) в зависимости от положения уровня Ферми.



1-300 К, 2-283 К, 3-270 К, 4-262 К, 5-235 К

Рис. 3а. Зависимость ОМС от величины магнитного поля в образцах $p\text{-Si}\langle B, \text{Mn} \rangle$ с положением уровня Ферми $F=E_V+0,385$ эВ, $E=100$ В/см, при различных температурах

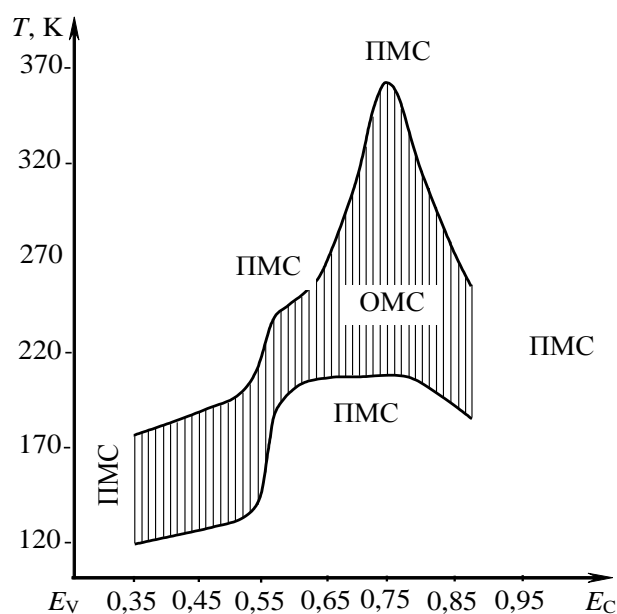


Рис. 3б. Температурная область существования ОМС в зависимости от положения уровня Ферми. $B=2$ Тл, $E=100$ В/см

Как видно из рис. 3б, кремний легированный марганцем, обладает большим ОМС в достаточно широком интервале температур. Управляя положением уровня Ферми, в материале можно изменять значение ОМС в достаточно широком интервале (1÷100 % при $T=300$ К). За границей

положения уровня Ферми в пределах от $F=E_V+0,29$ до $F=E_C-0,32$ эВ, а также в области температур $T=120\div 370$ К наблюдается ОМС.

В четвертой главе «Влияние внешних физических воздействий на ОМС в кремнии, легированном марганцем» приводятся экспериментальные результаты исследования зависимости ОМС от электрического поля, а также влияние интегрального и монохроматического освещения. При этом основной задачей было выявить закономерности изменения магнитосопротивления в компенсированном материале, установить оптимальные значения электрического поля, определить зависимость магнитосопротивления от интенсивности освещения с целью получения максимального ОМС.

Полученные экспериментальные данные однозначно показывают, что освещение приводит к уменьшению ОМС, т.е. эффекту гашения ОМС и инверсии знака МС. При этом установлено, что чем больше начальное значение ОМС в темноте, тем больше значений интенсивности освещения, при которых оно происходит (рис.4а).

Эти данные, с одной стороны, показывают, насколько существенную роль играет перезарядка энергетических уровней кластеров атомов марганца в магнитных свойствах полученного материала, а с другой стороны, выявляет еще одну уникальную функциональную возможность кремния с нанокластерами - фотомагнитную чувствительность такого материала, которая практически отсутствует в других магнитных полупроводниковых материалах.

Представляет интерес исследование влияния интенсивности освещения на свойства МС образцов при более низких температурах. На рис. 4б представлена температурная зависимость МС образцов кремния с нанокластерами при различных уровнях освещения фоновым светом. Как видно, при отсутствии освещения с понижением температуры значение ОМС достаточно быстро увеличивается и достигает своего максимального значения при $T=235\div 240$ К, где изменение значения ОМС составляет

$\Delta\rho/\rho=300\%$. Эту зависимость можно описать в виде $\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_T = \left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_0 \left(\frac{T_0}{T}\right)^5$ (где:

$T=240\div 330$ К, $T_0=300$ К). Дальнейшее понижение температуры до $T=215\div 220$ К приводит к уменьшению ОМС. При этом зависимость описывается

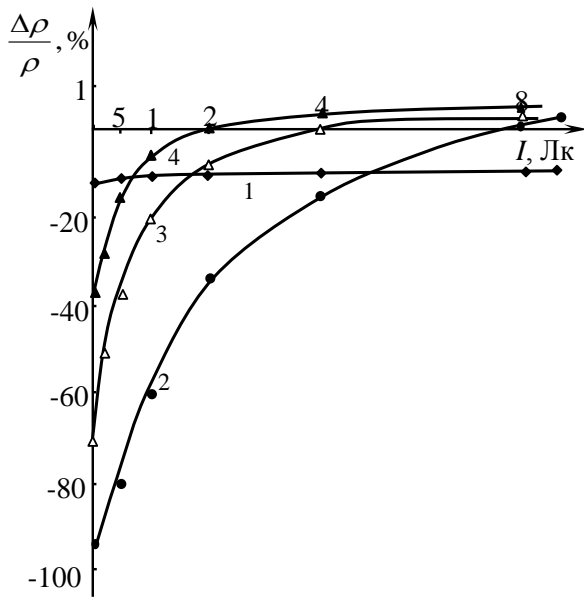
следующим законом $\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_T = \left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_1 \left(\frac{T_1}{T}\right)^{-5}$ ($T=170\div 240$ К). При температуре

$T\leq 170\div 175$ К меняется знак МС, оно переходит от ОМС к ПМС.

Аналогичные исследования проводились при освещении светом $I=10$ Лк; 40 Лк; 80 Лк; и 160 Лк (рис. 4б крив. 2, 3, 4, 5). При этом наблюдаются следующие интересные эффекты. Во-первых, освещение приводит к существенному уменьшению значения ОМС при данной температуре.

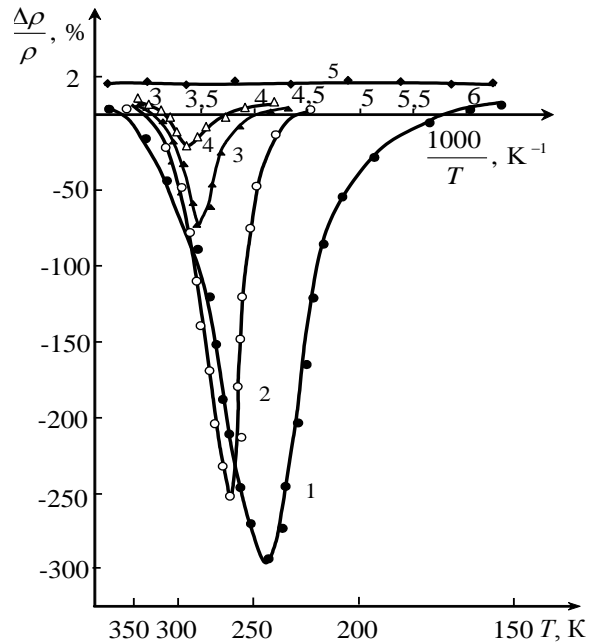
Например, при $T=240$ К значение ОМС уменьшается от $\frac{\Delta\rho}{\rho}\sim 300\%$ до нуля.

Во-вторых, при освещении температура, при которой наблюдается максимальное ОМС, смещается в сторону более высоких значений (крив. 2, 3, 4).



1- $F=E_V+0,3$ эВ, 2- $F=E_V+0,38$ эВ,
3- $F=E_V+0,42$ эВ, 4- $F=E_V+0,44$ эВ.

Рис. 4а. Зависимость МС от интенсивности освещения в образцах р-типа Si<B,Mn> с различным положением уровня Ферми при $E=100$ В/см и $T=300$ К



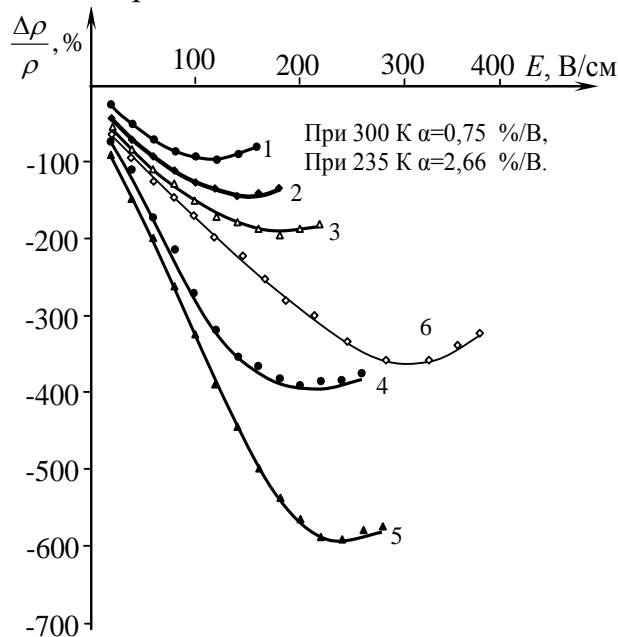
1-темновая; 2- $I=10$ Лк; 3-40 Лк;
4-80 Лк; 5-160 Лк

Рис. 4б. Зависимость МС от температуры в образцах S<B,Mn> с $F=E_V+0,38$ эВ при $E=100$ В/см, $B=2$ Тл

В-третьих, освещение существенно сужает температурную область существования ОМС. С ростом интенсивности освещения температурная область существования ОМС сужается еще больше, а при $I=160$ Лк ОМС практически исчезает, т.е. наблюдается только ПМС (рис. 4б, крив. 5). Здесь также следует выделить очень интересный эффект - возможность инверсии знака МС при освещении, т.е. освещение приводит к фазовому переходу.

В образцах кремния с положением уровня Ферми $F=E_V+0,385$ эВ было исследовано ОМС в зависимости от электрического поля при различных температурах (рис.5). Результаты показывают, что с ростом электрического поля при всех температурах значение ОМС линейно увеличивается, при дальнейшем увеличении электрического поля линейное увеличение значения ОМС ослабляется и достигает своего максимального значения при (E_m), затем оно медленно уменьшается. Как видно из рис.5, при понижении температуры область линейного увеличения значения ОМС расширяется и (E_m), наблюдаемые максимальные значения ОМС, смещаются в сторону больших значений электрического поля, а при температуре $T=235$ К, $E_m=240$ В, имеется максимальное значение ОМС $\left(\frac{\Delta\rho}{\rho} \sim 600\%\right)$.

При дальнейшем понижении температуры $T < 235$ К значение ОМС уменьшается, но при этом сохраняется внешний вид зависимости ОМС с ростом электрического поля.



1-300 К, 2-283 К, 3-270 К, 4-62 К, 5-235 К, 6-220 К

Рис. 5. Зависимость МС от электрического поля в образцах $p\text{-Si}\langle B, Mn \rangle$ с положением уровня Ферми $F = E_V + 0,385$ эВ, $B = 2$ Тл, при различных температурах:

Таким образом, полученные результаты исследования показывают еще один способ управления значением ОМС, а также тепло-электромагнитный эффект, который практически отсутствует в других магнитных полупроводниках. Эти эффекты также подтверждают, что кремний с нанокластерами атомов марганца обладает многофункциональными возможностями.

Обнаруженные крайне значительные эффекты гашения ОМС и инверсии знака МС, управляемые интенсивностью освещения при комнатной температуре,

в образцах кремния с нанокластерами, открывают новое и перспективное направление в приборостроении - разработку и создание принципиально новых классов датчиков освещения и магнитных датчиков с управляемыми параметрами при помощи освещения.

В пятой главе «Эффект ИК-гашения отрицательного магнитосопротивления в кремнии» приводятся результаты исследования спектральной зависимости ОМС в образцах $p\text{-Si}\langle B, Mn \rangle$ с магнитными нанокластерами атомов марганца при воздействии ИК-излучения в различных магнитных и электрических полях, температуры, а также от энергии и мощности ИК-излучения.

Исследовалось ОМС в образцах кремния с нанокластерами атомов марганца в зависимости от длины волны падающего света $\lambda = 1,2 \div 4$ мкм, при мощности излучения $5 \cdot 10^{-5}$ Вт/см², комнатной температуры и наличии магнитного поля $B = 0 \div 1,7$ Тл.

Для этого исследования была создана специальная установка на основе ИКС-21, позволяющая варьировать электрические и магнитные поля, температуру, а также длину волны ИК излучения и его мощность.

Относительное изменение ОМС образцов, вычисленное на основе выражения $\left[\left(\frac{\Delta\rho}{\rho} \right)_{mem} / \left(\frac{\Delta\rho}{\rho} \right)_{hv} \right]$ (где $\left(\frac{\Delta\rho}{\rho} \right)_{hv}$ - ОМС при освещении образцов ИК

светом с энергией $h\nu$, а $\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_{\text{тем}}$ - ОМС образцов, когда ИК излучение отсутствует) в зависимости от энергии падающих фотонов ИК излучения представлено на рис.6а.

Как показали результаты исследования, начиная с $h\nu=0,3$ эВ (4 мкм), в образцах с положением уровня Ферми $F=E_V+0,385$ эВ имеет место уменьшение значения ОМС. С ростом энергии фотонов падающего света уменьшение ОМС усиливается и достигает своего максимального значения при $h\nu=1$ эВ. Установлено, что при воздействии ИК- излучения при комнатной температуре с энергией падающих фотонов $h\nu=1$ эВ значение ОМС уменьшается более чем в 30 раз.

Таким образом, эти результаты исследования показывают возможность управления значением ОМС в достаточно широком интервале в зависимости от длины волны ИК- света $\lambda=1,2\div 4\mu\text{м}$.

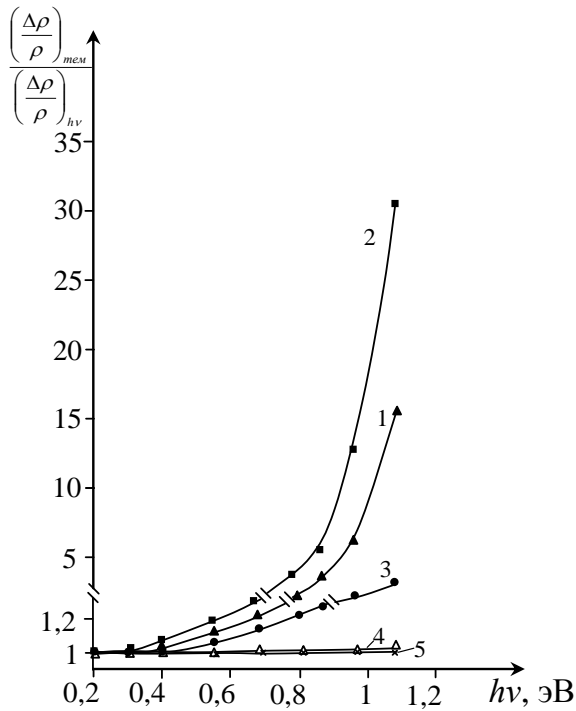
В результате исследования установлено, что эффект гашения ОМС ИК светом наблюдается во всех образцах кремния p - типа с нанокластерами атомов марганца. Но при этом следует отметить, что степень гашения существенно зависит от положения уровня Ферми в образцах, т.е. от удельного сопротивления образцов. Как видно, максимальное гашение ОМС имеет место в образцах с $F=E_V+0,375$ эВ. Со смещением уровня Ферми от $F=E_V+0,375$ эВ в сторону середины запрещенной зоны кратность гашения уменьшается. В образцах с уровнем Ферми $F>E_V+0,48$ эВ, а также в перекомпенсированных образцах эффект гашения ОМС не наблюдается.

На рис.6 б. представлена зависимость ОМС от электрического поля при различных значениях энергии фотонов, для образцов $p\text{-Si}\langle\text{B, Mn}\rangle$, с положением уровня Ферми $F=E_V+0,37$ эВ.

Результаты исследования показали, что влияние ИК- излучения на ОМС в исследуемых образцах существенно зависит от значения приложенного электрического поля. При этом установлено, что в области низких электрических полей $E=1\div 20$ В/см усиливает влияние ИК- света на ОМС, т.е. при этом эффект гашения усиливается и достигает своего максимального значения при $E=20\div 25$ В/см. Можно сказать, что электрическое поле стимулирует ИК- гашение ОМС. При дальнейшем росте величины электрического поля наблюдается обратный эффект, т.е. с ростом электрического поля влияние ИК- света на ОМС ослабляется, т.е. эффект гашения замедляется, а при $E\geq 150$ В/см эффект гашения во всех исследуемых областях спектра исчезает.

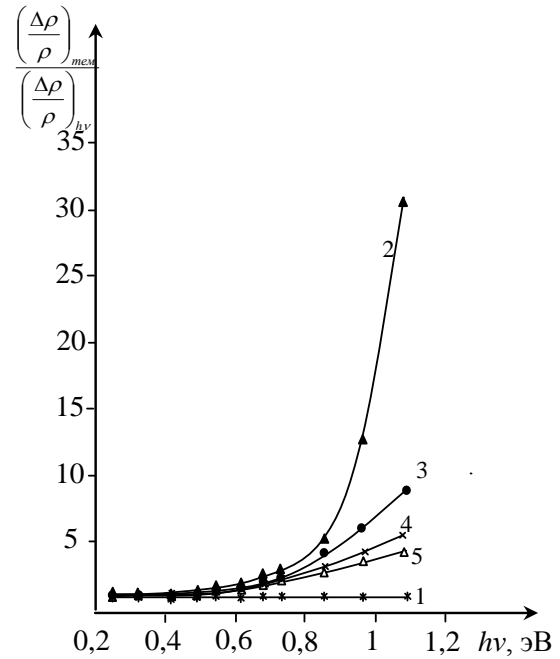
Таким образом, в области высоких электрических полей $E>20$ В/см действие электрического поля направлено против действия ИК-излучения и происходит их взаимная полная компенсация при $E=150$ В/см. Установлено, что аналогичный эффект имеет место во всех образцах p -типа, но при этом следует отметить, что со смещением уровня Ферми в образцах в сторону середины запрещенной зоны, характер наблюдаемого взаимного воздействия электрического поля и ИК- света сохраняется, остается, но при этом

величина стимулирующего значения электрического поля смещается в сторону более низких значений.



1- $F=E_V+0,35$ эВ, 2- $F=E_V+0,37$ эВ,
3- $F=E_V+0,44$ эВ, 4- $F=E_V+0,48$ эВ, 5- $F=E_C - 0,44$ эВ.

Рис.6а. Спектральная зависимость кратности уменьшения ОМС под действием ИК-света в образцах Si<В,Мn> с различным положением уровня Ферми при $E=20$ В/см, $V=1,7$ Тл, $T=300$ К.



1- 2 В/см, 2-20 В/см,
3- 50 В/см, 4- 80 В/см, 5-100 В/см.

Рис.6 б. Спектральная зависимость кратности уменьшения ОМС под действием ИК-света при различных напряженностях электрического поля при $T=300$ К, $V=1,7$ Тл,

Результаты исследования температурной зависимости ОМС в темноте и при ИК-излучении с $h\nu=0,45$ эВ; $0,62$ эВ; $0,85$ эВ энергии фотонов представлены на рис. 7. Как видно из рис. 7, наличие ИК- излучения приводит к существенному изменению $\frac{\Delta\rho}{\rho}(T)$. Эти изменения в основном состоят из следующих моментов:

1. Значение температуры (T_{\max}), при которой наблюдается максимальное ОМС, сдвигается в сторону более высоких температур. Чем больше энергия фотонов падающего ИК-света, тем больше температурный сдвиг.

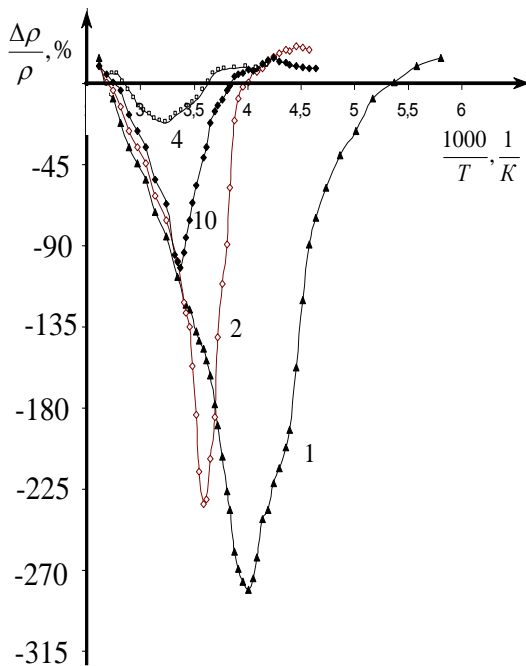
2. Значение ОМС при (T_{\max}) также существенно уменьшается. Например: при $h\nu=0,85$ эВ $\left(\frac{\Delta\rho}{\rho}\right)_{\max}$ уменьшается от 300 % до 25 % т.е. в 12 раз.

3. Отмечен интересный физический процесс, который приводит к существенному сужению температурной области существования ОМС, с увеличением энергии падающих фотонов. При этом следует отметить, что эти сужения происходят в основном за счет смещения нижней границы

температуры. А инверсия знака при более высоких температурах существенно не зависит от энергии ИК- излучения.

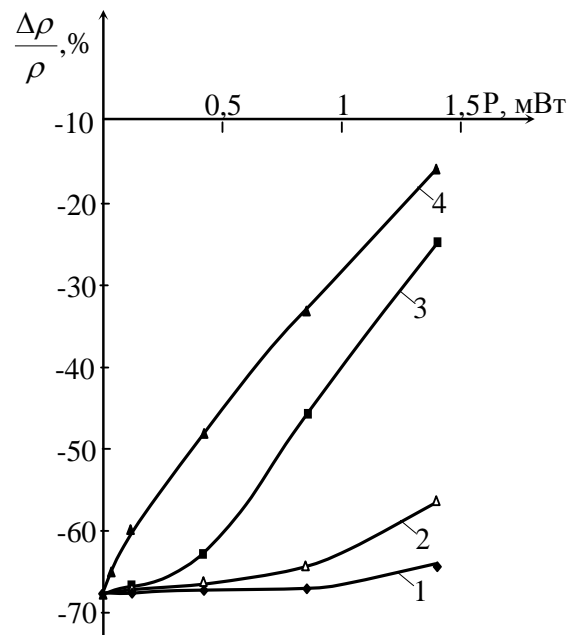
На рис 8. представлена зависимость ОМС от мощности ИК излучения в образцах $p\text{-Si}\langle\text{B,Mn}\rangle$, в которых положение уровня Ферми было равно $F=E_V+0,37$ эВ при различных длинах волн (λ).

Как видно из рис.8, с увеличением интенсивности ИК- излучения значение ОМС уменьшается. Например, при энергии фотонов $h\nu=1,08$ эВ, ответ на ИК- излучение начинается при $P=0,03$ мВт. Значение ОМС уменьшается в 7 раз с увеличением мощности ИК- излучения до $P=1,4$ мВт. Результаты показывают, что ответ ОМС на ИК- излучение смещается в сторону большей мощности излучения с уменьшением энергии фотонов падающего ИК- излучения. Например, при $h\nu=0,5$ эВ ответ на ИК- излучение начинается с 0,4 мВт.



1- темновая, 2- 0,45 эВ,
3- 0,62 эВ, 4- 0,85 эВ

Рис. 7. Зависимость магнито-сопротивления от температуры в образцах $p\text{-Si}\langle\text{B,Mn}\rangle$ с $F=E_V+0,37$ эВ при различных энергиях фотонов ИК- света, $B=1,7$ Тл.



1- $h\nu=0,5$ эВ; 2- $h\nu=0,62$ эВ;
3- $h\nu=0,85$ эВ; 4- $h\nu=1,08$ эВ

Рис.8. Зависимости МС от интенсивности монохроматического излучения в бразцах кремния при различных энергиях фотонов в $E=100$ В/см при $B=1,7$ Тл , $T=300$ К.

Эти данные открывают ещё одну функциональную возможность кремния с нанокластерами атомов марганца, т.е. возможность существенного управления магнитными свойствами материала с помощью мощности ИК света.

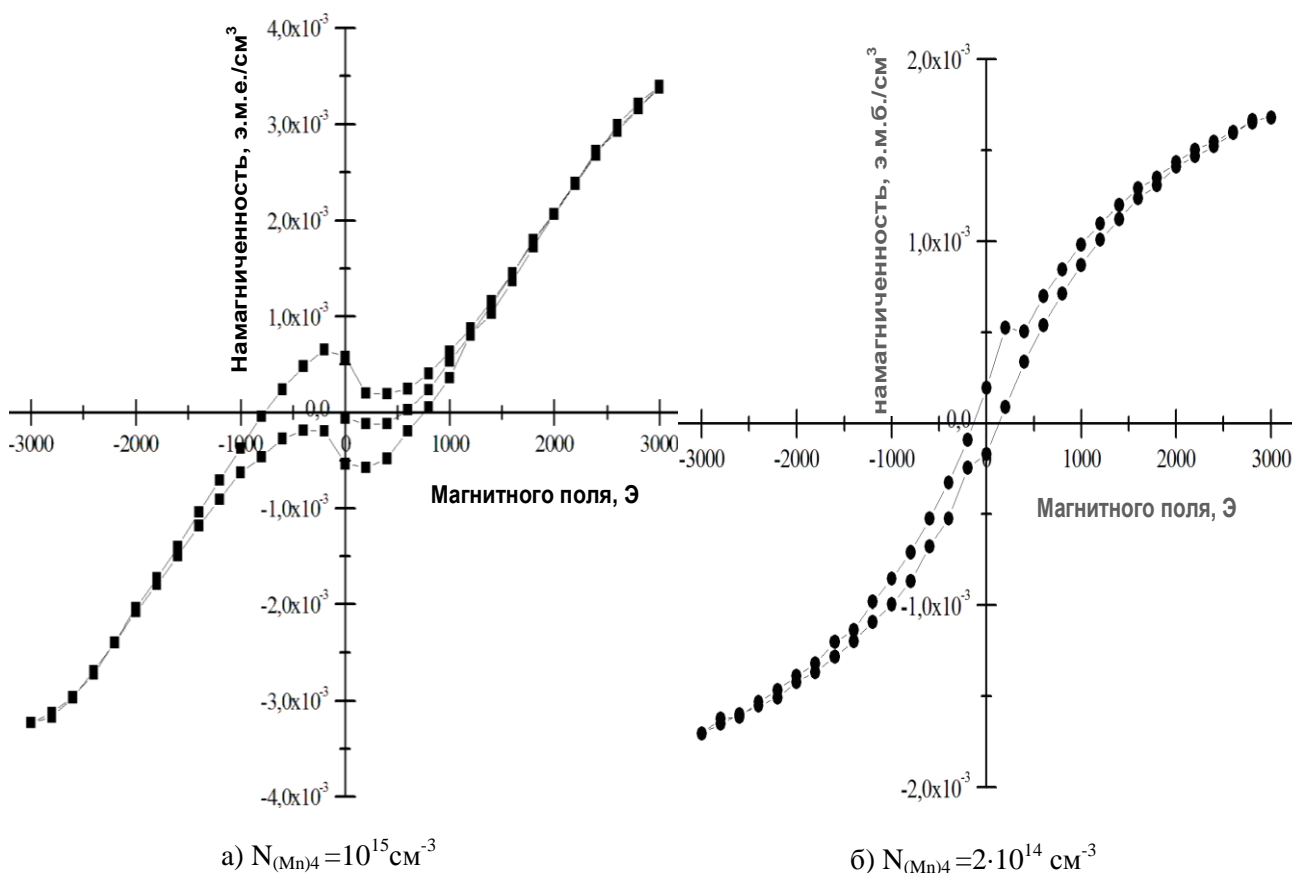
Воздействуя ИК излучением на образцы, можно не только уменьшить значение ОМС более чем в 30 раз, в зависимости от длины волны, но и при более высоких мощностях ИК излучения наблюдать инверсию знака МС, т.е. переход МС от ОМС к ПМС.

Таким образом, выбирая оптимальные значения длины волны ИК-излучения и величины электрического поля, можно целенаправленно

управлять магнитными свойствами таких материалов. В этом плане кремний с нанокластерами атомов марганца является уникальным объектом для создания не только нового класса более чувствительных фотоманитных приборов, работающих в ИК- области, но также позволяет развивать новое научное направление - ИК- спинтроника.

В шестой главе «**Ферромагнитное состояние кремния и использование функциональных возможностей кремния с магнитными нанокластерами атомов марганца при разработке принципиально новых приборов**» рассмотрено исследование ферромагнитного состояния кремния *p*-типа, легированного марганцем. Ферромагнитное состояние наблюдается в образцах кремния с максимальной концентрацией магнитных кластеров ($N \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$) в области низких температур до $T=30 \text{ К}$.

Намагниченность таких образцов в области низких температур исследовалась на установке СКВИД - магнетометре. Результаты исследования зависимости намагниченности от магнитного поля в образцах кремния с различной концентрацией нанокластеров атомов марганца представлены на рис.9. при температуре $T=30 \text{ К}$. Как видно из рисунка, в области низких температур ($T \leq 30 \text{ К}$) в образцах, где наблюдается максимальное значение ОМС при $T=300 \text{ К}$, зависимость намагниченности от магнитного поля имеет гистерезисный характер, что свидетельствует о ферромагнитном состоянии кремния с нанокластерами (рис.9 а).



9-расм. Турли концентрациядаги марганец атомларининг нанокластерлари бўлган кремнийнинг магнитланганлигини магнит майдонга боғлиқликлиги (гистерезис). $T=30 \text{ К}$

С уменьшением концентрации нанокластеров гистерезисный характер зависимости намагниченности от магнитного поля H ослабляется (рис.9 б).

В образцах $n\text{-Si}\langle\text{B,Mn}\rangle$ не было обнаружено такого явления. Установлено, что ферромагнитное состояние кремния с нанокластерами атомов марганца с ростом температуры ослабляется, а при $T\sim 40\div 50$ К практически исчезает. На основе экспериментальных данных нами был рассчитан магнитный момент нанокластера, значение которого равно $\mu = 800\mu_B$.

Экспериментально показано, что с ростом температуры температурная зависимость намагниченности образцов кремния с магнитными нанокластерами $(\text{Mn})_4$ линейно практически уменьшается (рис.10).

Полученные экспериментальные результаты показывают, что формирование магнитных нанокластеров атомов марганца существенно влияет на магнитные свойства кремния.

Управляя концентрацией таких кластеров в области $T=230\div 330$ К,

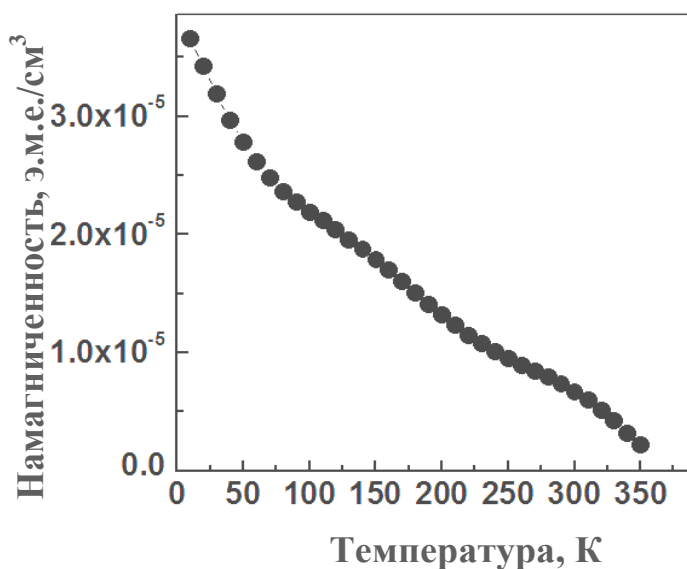


Рис.10. Температурная зависимость намагниченности кремния с магнитными нанокластерами $(\text{Mn})_4$

можно обнаружить anomalно высокое ОМС. В области низких температур $T < 40$ К кремний с магнитными нанокластерами переходит в новое фазовое состояние, т.е. в ферромагнитное.

Обнаруженный эффект ферромагнетизма в $p\text{-Si}\langle\text{B,Mn}\rangle$ в области температур $T < 40$ может быть объяснен переориентацией спинов $\left(S_{\text{Mn}4} = 4 \cdot \frac{5}{2} = 10\right)$ магнитных нанокластеров, обладающих существенным магнитным моментом.

В настоящее время нами разработана технология легирования кремния марганцем, позволяющая получить кремний с концентрацией магнитных нанокластеров до $N=10^{16}\div 10^{17}$ см⁻³, что позволяет не только увеличить значение ОМС при комнатной температуре, но и также расширяет температурную область существования ферромагнитного состояния.

Результаты исследования показывают, что на основе таких материалов можно создать принципиально новый класс высокочувствительных магнитодатчиков, фотомагнитных приборов, а также приборов спинтроники.

Приношу глубокую и искреннюю благодарность своему руководителю академику АН РУз, доктору физико-математических наук, профессору

Бахадирханову Мухамедкабиру Саидхановичу внимание и ценные советы, данные при обсуждении полученных результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований управления магнитными свойствами кремния с магнитными нанокластерами в зависимости от их концентрации и электрических параметров в широком интервале температур, при различных внешних воздействиях сделаны следующие выводы:

1. Определен оптимальный способ получения кремния с магнитными нанокластерами, как материала нанoeлектроники и спинтроники с наноразмерными структурами, обладающего новыми уникальными физическими свойствами.

2. Установлены размеры магнитных нанокластеров атомов марганца в кристаллической решетке кремния и показана возможность изменения этих размеров от 0,7 нм до 1,4 нм.

3. В кремнии с магнитными нанокластерами атомов марганца, при концентрации нанокластеров 10^{15} см^{-3} и при комнатной температуре обнаружено высокое отрицательное магнитосопротивление 300 %.

4. Показана возможность управления величиной отрицательного магнитосопротивления до 100 раз с изменением интенсивности интегрального света (0÷20 Лк).

5. Установлена зависимость отрицательного магнитосопротивления от длины волны инфракрасного света, температуры и напряжённости электрического поля.

6. Обнаружено ферромагнитное состояние в кремнии с концентрацией нанокластеров марганца более $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ в области низких температур ($T \leq 30 \text{ K}$).

7. Определены области существования отрицательного магнитосопротивления в зависимости от положения уровня Ферми в пределах 120÷370 К температур.

8. Предложен физический механизм эффекта высокотемпературного отрицательного магнитосопротивления в кремнии с магнитными нанокластерами, обусловленный участием в проводимости локализованных носителей заряда при воздействии внешнего электрического и магнитного полей.

9. Обнаружено максимальное значение отрицательного магнитосопротивления 35 % в перекомпенсированном кремнии n- типа, легированного марганцем Si<B,Mn> в области 120÷190 К температур.

10. На основе кремния с магнитными нанокластерами атомов марганца Показана возможность создания высокочувствительных магнитных, фотомагнитных, температурных и многофункциональных датчиков, работающих в интервале температур от 200 до 360 К.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.27.06.2017.FM/T.34.01 ON AWARD OF
SCIENTIFIC DEGREE OF DOCTOR OF SCIENCES AT THE PHYSICAL
AND TECHNICAL INSTITUTE, INSTITUTE OF ION-PLASMA AND
LASER TECHNOLOGIES, SAMARKAND STATE UNIVERSITY**

**TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY NAMED AFTER
ISLAM KARIMOV**

MAVLONOV GIYOSIDDIN KHAYDAROVICH

**CONTROL OF THE MAGNETIC PROPERTIES OF SILICON
WITH NANOCCLUSERS OF IMPURITY ATOMS**

01.04.10 – Physics of Semiconductors

**ABSTRACT OF DISSERTATION OF DOCTOR OF SCIENCE (DSc)
ON THE PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES**

TASHKENT – 2018

The theme of dissertation of doctor of sciences (DSc) on physical and mathematics Sciences registered at the Supreme Attestation Commission of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number. B2017.1.DSc/FM79.

The dissertation has been prepared in Tashkent state technical university named after Islam Karimov.

Abstract of the dissertation is posted in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) on the website of the info.fti@uzsci.net and information and educational portal «ZiyoNet» at www.ziyo.net.uz.

Scientific consultant: **Iliyev Xolmurat Midjidovich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Official opponents: **Rembeza Stanislav Ivanovich**
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Zaynobiddinov Sirojiddin
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

Kasimov Abdugappor Kokharovich
Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Dosent

Leading organization: **Tashkent University information Technoloyiy**

The defence of the dissertation will be held on «__» _____ 2018, at __ at the meeting of the Scientific Council number Dsc.27.06.2017.FM/T.34.01 at the Physical and Technical Institute, Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, Samarkand State University (Address: 2B Bodomzor yuli str., 100084 Tashkent. Tel./Fax: (+99871) 235-42-91, e-mail: lutp@uzsci.net).

The dissertation can be looked through in the Information Resource Centre of the Physical and Technical Institute (registered under No _5_). Address: 2B Bodomzor yuli str., 100084 Tashkent. Tel.: (+99871) 235-42-91.

The abstract of dissertation was distributed on «__» _____ 2018
(Registry record No _5_ dated «__» _____ 2018)

S. A. Bakhrarov
Chairman of scientific council on award of scientific degrees, D.F.-M.S., academician AS UzR

A. V. Karimov
Scientific secretary of scientific council on award of scientific degrees, D.F.-M.S., professor

I. G. Atabaev
Chairman of scientific Seminar under Scientific Council on award of scientific degrees, D.F.-M.S., professor

INTRODUCTION (abstract of DSc thesis)

The aim of the study is controlling magnetic properties of silicon with magnetic nanoclusters depending on their concentration and electrical parameters in a wide range of temperatures under different external effects.

The object of the study is single crystalline silicon type- KDB - 2, 3, 5, 10, 100. Manganese was the impurity with paramagnetic atoms characterized by electronic structure $3d^5 4s^2$ with spin $S = \frac{5}{2}$.

Scientific novelty of research consists of the following:

optimal low-temperature step-by-step technique of diffusion doping was developed that allows the formation of nanoclusters of manganese atoms with magnetic properties in the entire bulk of silicon sample with a controlled distribution and parameters.

the technique of boosting thermal stability of the parameters of silicon doped with atoms of manganese at high temperatures was proposed which is due to the formation of nanoclusters of manganese atoms;

a high negative magnetoresistance in silicon at room temperature was revealed due to the increase in the concentration of magnetic nanoclusters of manganese atoms up to 10^{15} cm^{-3} ;

a linear increase of the negative magnetoresistance in silicon with magnetic nanoclusters of manganese atoms was determined by the increase in the value of the magnetic field;

the effect of quenching of the negative magnetoresistance under the influence of the integral and infrared light due to reduction of the negative magnetoresistance down to 100 times that have strong magnetic moment and the charge state;

a transition to the ferromagnetic state of silicon at low temperatures 30 K, due to the streamlining of the orientation of the magnetic spins of the cluster $(\text{Mn})_4$, having a magnetic moment was detected;

the calculation of the magnetic moment of nanoclusters of manganese atoms by using the expression using the values of magnetization of silicon (χ_{Mn}) determined from experimental results at low temperatures 10 K was carried out;

a linear decrease in the magnetization of silicon with increasing temperature due to the disordering of the spins of nanoclusters with an increase in (kT) of energy was detected.

a possibility of controlling the magnitude of the negative magnetoresistance of 6-fold at 240 K in a wide range of electrical (0,1÷600 V/cm) and magnetic (0,2÷2 T) fields.

Implementation of research results. Based on the results of study of controlling the magnetic properties of silicon with magnetic nanoclusters depending on their concentration and electrical parameters in a wide range of temperatures under different external effects:

used the results obtained in this research work will significantly improve the technology of manufacturing high-voltage high frequency diodes (high frequency

and high voltage diodes) and stability to external influences (temperature and γ - irradiation), JSC «Foton» (certificate number 02. 2074., 06.10. 2017 AK Uzeltehsanoat);

the theoretical results of the thesis were used in processing the experimental data in the work performed at the Institute of solar energy of the Academy of Sciences of Turkmenistan in the framework of the international grant «Development and production of fundamentally new solar cells with broad spectral sensitivity (0.1-3 μm) based on silicon with nedovarennye structures» (reference No. 162/17 from the Institute of solar energy of the Academy of Sciences of Turkmenistan from 09 Nov 2017).

the results were used to obtain nanostructures of silicon with a low activation energies of impurities with low temperature and gradual diffusion models. As a result, in the active phase of silicon carbide was conducted by diffusion of impurity atoms of boron and aluminum in the framework of the grant No. derivatives F3-FA-0-56434 on «Physical regularities of formation of thin-film structures and structures with nano-inclusions for solar cells and semiconductor devices» (reference FTA-02-11/940 from the Agency for science and technology of the Republic of Uzbekistan from October 24, 2017).

Publication of research results. Within the thesis 33 scientific works, including 2 monographs, 13 articles in journals recommended by the Higher attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for the publication of basic scientific results of dissertations were published.

Structure and scope of the thesis. The thesis consists of introduction, six chapters, conclusion and list of references. The work contains 200 pages of typescript.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙЎХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; part I)

1. Бахадирханов М.К., Илиев Х.М., Мавлонов Г.Х., Аюпов К.С., Тачилин С.А. Управление магнитными свойствами кремния с нанокластерами примесных атомов // Монография. «ТашГТУ» 2017, с.188.

2. Бахадирханов М.К., Илиев Х.М., Аюпов К.С., Тачилин С.А. Саттаров О.Э., Мавлонов Г.Х. Кремний с магнитными кластерами // Монография. «ТашГТУ» 2014, с.160.

3. Bakhadyrkhanov M.K., Mavlonov G.Kh., Iliyev Kh.M. Influence of Infrared Radiation on the Magnetic Properties of Silicon with Nanoclusters of Manganese Atoms // Nanoscience and Nanotechnology 2017, Volume 7, Number 1, P. 1-3. (№12 Index Copernicus, №35 cross ref, Impact Factor 0,4).

4. Илиев Х.М., Сатаров О.Э. Мавлонов Г.Х. О термостабильности кластеров атомов марганца в кремнии // Доклады АН РУз. Ташкент, 2017. № 1.– С. 13-16. (01.00.00., № 7)

5. Аюпов К.С., Бахадирханов М.К., Илиев Х.М., Мавлонов Г.Х., Тачилин С.А. Многофункциональный датчик физических величин на основе кремния с наноструктурами атомов марганца // Приборы, 2017. №4, С.7-10. (05.00.00., № 63).

6. Мавлонов Г.Х. Управление магнитосопротивлением в кремнии с магнитными нанокластерами атомов марганца под действием инфракрасного освещения // Узбекистон физика журнали 2017 г. Т.19, №5. С. - 65. (01.00.00., № 6).

7. Мавлонов Г.Х. Магнитный момент нанокластеров атомов марганца в решетке кремния // Узбекистон физика журнали 2016 г. Т.18, №2. С. 298-301. (01.00.00., № 6).

8. Мавлонов Г.Х. Особенности ферромагнитного состояния кремния с магнитными нанокластерами атомов марганца // Доклады АН РУз. – Ташкент, 2015. № 5. С. 26-29. (01.00.00., № 7).

9. Мавлонов Г.Х. Исследование аномального эффекта холла в кремнии с магнитными кластерами атомов марганца // ТДТУ хабарлари. Тошкент 2015г. №3, С. 85-89. (05.00.00., № 15).

10. Bakhadyrkhanov M.K., Mavlonov G.H., Iliyev X.M., Ayupov K.S. Specific Features of Magnetoresistance in Overcompensated Manganese-Doped Silicon // Semiconductors, 2014, Vol. 48, No. 8, pp. 986-988. (№11 Springer, Impact Factor 0,602).

11. Bakhadyrkhanov M.K., Mavlonov G.Kh., and Iliyev Kh.M. Control of the Magnetic Properties of Silicon with Manganese Atom Nanoclusters // Technical Physics, 2014, Vol. 59, No. 10, pp. 1556-1558. (№11 Springer, Impact Factor 0,6).

12. Бахадирханов М.К., Мавлонов Г.Х., Илиев Х.М. Угловая зависимость магнетосопротивления в кремния при наличии нанокластеров

атомов марганца // Узбекистон физика журнали т.16, №1. 2014 г. С. 46-50. (01.00.00., № 6)

13. Бахадирханов М.К., Мавлонов Г.Х., Илиев Х.М. Особенности магнитных свойств кремния с магнитными нанокластерами // ТДТУ хабарлари. Тошкент 2013 №4, С. 56-60. (05.00.00., № 15).

14. M.K. Bakhadyrkhanov, G.Kh. Mavlonov, S.B. Isamov, Kh.M. Iliyev, K.S. Ayupov, Z.M. Saparniyazova, and S.A. Tachilin. Transport Properties of Silicon Doped with Manganese via Low Temperature Diffusion // Inorganic Materials, 2011, Vol. 47, No. 5, pp. 479-483. (№11 Springer, Impact Factor 0,62)

15. Bakhadyrkhanov M.K., Ayupov K.S., Mavlyanov G.Kh., Iliyev Kh.M., and Isamov S.B. Photoconductivity of Silicon with Nanoclusters of Manganese Atoms // Russian Microelectronics, 2010, Vol. 39, No. 6. pp. 401-404. (№11 Springer, Impact Factor 0,29)

II бўлим (II часть; part II)

16. Бахадирханов М.К., Мавлонов Г.Х., Аюпов К.С., Илиев Х.М. Кластеры примесных атомов новое уникальное состояние примесных атомов в полупроводниках // Научно-методические проблемы инженерной физики» Республика илмий техник анжуманлар туплами. Ташкент 2017 г., 8-9 сентября, С.58-61.

17. Бахадирханов М.К., Мавлонов Г.Х. Сатаров О.Э., Аюпов К.С., Зикриллаев Х.Ф. Магнитные свойства кремния, легированного марганцем «Научно-методические проблемы инженерной физики» Республика илмий - техник анжуманлар туплами. Ташкент 2017 г., 8-9 сентября, С.61-63.

18. Бахадирханов М.К., Илиев Х.М., Мавлонов Г.Х. Функциональные возможности кремния с магнитными нанокластерами атомов марганца для разработки // Научно-методические проблемы инженерной физики» Республика илмий -техник анжуманлар туплами. Ташкент 2017 г., 8-9 сентября, С.63-65.

19. Бахадирханов М.К., Мавлонов Г.Х., Исаиов С.Б., Аюпов К.С., Мелибаев Д. Новые фотомагнитные материалы на основе кремния с магнитными нанокластерами атомов марганца // «Наука, техника и инновационные технологии в эпоху могущества и счастья» Материалы Международной научной конференции Ашхабад. 12-13 июня, 2017 г. С. 77-79.

20. Бахадирханов М.К., Илиев Х.М., Мавлонов Г.Х., Азизов М.К. Многофункциональный датчик на основе кремния с нанокластерами марганца // Материалы республиканской научной конференции «неравновесные процессы в полупроводниках и полупроводниковых структур» Ташкент. 1-2 февраля 2017 г. С.64-65.

21. Мавлонов Г.Х., Хайитбоев И.А. Использование кремния с магнитными нанокластерами в качестве датчиков магнитного поля // Материалы республиканской научной конференции «неравновесные процессы в полупроводниках и полупроводниковых структур» Ташкент. 1-2 февраля 2017 г. С.64-65.

22. Бахадирханов М.К., Илиев Х.М., Аюпов К.С., Мавлонов Г.Г., Хайитбоев И.А. Фотомагнитные свойства кремния с магнитными нанокластерами атомов марганца «Замонавий физиканинг долзарб муаммолари» VII- Илмий-назарий анжуман материаллари. 2017 й. Термиз., 19-20 май. С.12-14.

23. Илиев Х.М., Аюпов К.С., Мавлонов Г.Х., Саттаров О.Э. Курбонова У.Х.Управления магнитными свойствами кремния с магнитными нанокластерами инфракрасном излучением // Современное проблемы физики конденсированного состояния – СПФКС -2016. Тезисы докладов Республиканской научной конференции. Бухара. 12-14 апреля. 2016. с. 138-139.

24. Ayupov K.S., Iliyev Kh.V., Mavlonov G. Magnetic nanoclusters in silicon lattice. OF XII International scientific conference «Solid State physics» 26-28 th April, 2016 Astana., 230-231.

25. Илиев Х.М., Тачилин С.А., Содиков У.Х. Формирование магнитных кластеров атомов гадолия в // «Техника ва технологиянинг долзарб муаммолари, уларнинг нерготежамкор

ва инновацион ечимлари» Республика илмий-техник анжумани 2016 йил 20-22 апрель Фаргона – 2016. с.8.

26. Bakhadirkhanov .M. K., Mavlonov G.X., S.B.Isamov . Physical fundamental of formation of nanoclusters with controllable parameters as a novel way in obtaining the bulk structured semiconductor materials // OF XII International scientific conference «Solid State physics» 26-28 th April, 2016 Astana., 228-230.

27. Аюпов К.С., Илиев Х.М., Мавлонов Г.Х. Магнетосопротивление кремния с нанокластерами атомов марганца при инфракрасном освещении // V Международная конференция актуальные проблемы молекулярной спектроскопии конденсированных сред. Самарканд, 22-24 Сентября 2016 г. С. 96-97.

28. Илиев Х.М., Мавлонов Г.Х., Саттаров О.Э., Бахарырханов М.К., Аюпов К.С. Ферромагнитное состояние кремния с магнитными нанокластерами. VI-международная конференция «Кристаллофизика и деформационное поведение перспективных материалов» Тезисы докладов. МИСиС 26-28 мая 2015 г. МОСКВА. С 131.

29. Бахадирханов М.К., Мавлонов Г.Х., Илиев Х.М. и др. Физические основы формирования нанокластеров примесных атомов в полупроводниках. Международной конференции «Кремний -2014». Иркутск, 7-12 июля. 74-75.

30. Bakhadyrkhanov M. K., Mavlonov G. Kh., and Iliyev Kh. M. Ferromagnetic state of silicon samples with magnetic clusters of manganese atoms. Конденсатланган мухитлар физикаси ва материалшуностликнинг долзарб масалалари. «Республика илмий - техникавий анжумани» Фаргона 2014 й, 14-15 май. С. 35-36.

31. Мавлонов. Г.Х. Магнитные свойства кремния, легированного атомами европия. Ярим ўтказгичлар физикасининг долзарб муаммолари. «Республика илмий – амалий семенари материаллари» УзМУ, Тошкент 2014 й. 22 декабрь. С. 81-84.

32. Илиев Х.М., Мавлонов Г.Х., Бахадырханов М.К., Аюпов К.С., Хайдаров К. Саттаров О.Э. Фотомагнитные свойства кремния с магнитными кластерами атомов марганца. Материалы III международной конференции по Оптическим и Фотоэлектрическим явлениям в полупроводниковых микро и наноструктурах. Фергана 14-15 ноября 2014 года, С. 27-28.

33. М.К. Бахадырханов, Г.Х. Мавлонов, С.Б. Исамов. Магнитные кластеры атомов марганца и их влияние на магнитные свойства кремния. 3-Международная научная конференция «Физика и физическое образование: достижения и перспективы развития». Кыргызская Республика. Бишкек, 19-25 август 2011 г. с. 57.

Автореферат «Til va adabiyot ta'limi» журнаlidan таҳририятида таҳрирдан ўтказилиб, ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги матнлар ўзаро мувофиқлаштирилди (05.12.2017йил).

Босишга рухсат этилди: 09.02.2018 йил.
Бичими 60x45 ¹/₈, «Times New Roman»
гарнитурда рақамли босма усулида босилди.
Шартли босма табағи 3,7. Адади: 100. Буюртма: № 40.

Ўзбекистон Республикаси ИИВ Академияси,
100197, Тошкент, Интизор кўчаси, 68.

«АКАДЕМИЯ НОШИРЛИК МАРКАЗИ»
Давлат унитар корхонасида чоп этилди.